



**João Catarino Ferreira Teodósio**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

## **Otimização de parâmetros de Eletroerosão de penetração por métodos de Taguchi**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Carla Maria Moreira Machado, Prof. Auxiliar,  
FCT- UNL

Júri:

Presidente: Prof. Dra. Catarina Isabel Silva Vidal

Arguente: Prof. Dra. Carla Maria Moreira Machado

Vogal: Prof. Dr. José Filipe Castanheira Pereira Antunes Simões



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2019**



Otimização de parâmetros de eletroerosão de penetração por métodos de Taguchi

Copyright ©, 2019, João Catarino Ferreira Teodósio, FCT/UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito,

perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





## **Agradecimentos**

Agradeço a todos os intervenientes diretos ou indiretos que participaram no desenvolvimento desta Dissertação.

Gostaria de começar por agradecer à Prof. Carla Machado, do Departamento de Engenharia Mecânica, por toda a orientação, pela ânimo e força que me transmitiu e pelo interesse evidente que tem pelas temáticas ligadas diretamente à Indústria, e que tanto importam para o desenvolvimento tecnológico.

Gostaria também de agradecer ao Prof. António Mourão, do Departamento de Engenharia Mecânica, pelo incentivo e reforço positivo transmitido.

Agradecer também a toda a minha família e amigos por toda a compreensão e força que me deram durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Em especial aos meus pais por me terem dado a oportunidade de estudar e crescer a título pessoal e profissional.

Muito Obrigado



## Resumo

A Indústria dos Moldes para injeção de plástico em Portugal é um sector que tem vindo a crescer e a ganhar projeção internacional nas últimas décadas. Trata-se de uma indústria impulsionada pela procura externa e reconhecida mundialmente pela qualidade e competitividade. Com um mercado cada vez mais dinâmico em que “tempo é dinheiro”, o cumprimento dos prazos de entrega ao cliente é visto como um ponto crucial em todo o processo. Para atingir esse objetivo é necessário otimizar os processos produtivos de modo a obter a maior produtividade possível, reduzindo assim o prazo de entrega e até possibilitando melhores preços para o produto.

É neste sentido que nesta dissertação se estuda o processo de erosão de penetração com o objetivo de otimizar um dos processos mais morosos e dispendiosos da fase de maquinagem de um molde.

Fez-se uma breve introdução onde se expõem os objetivos da dissertação e um pouco da história do desenho de experiências.

Segue-se o enquadramento onde se introduz o setor da Indústria dos moldes em Portugal, se descreve o molde e quais são as fases principais por que passa a sua produção. É também dada uma breve explicação dessas fases, dando maior ênfase à fase de maquinagem, em específico aos processos de erosão. No capítulo seguinte é explicado o método de Taguchi e a sua aplicação à eletroerosão.

Passamos então para o planeamento dos ensaios onde são identificadas as características de qualidade que queremos estudar, identificam-se os parâmetros a otimizar de entre os possíveis tendo sempre em vista as características de qualidade a melhorar. É aplicado o método de Taguchi e são realizados os ensaios.

Com os resultados obtidos é feita uma análise e propostos modelos de maquinagem que são também ensaiados e se retiram as devidas conclusões.

**Palavras-chave:** moldes para injeção de plásticos, prazos de entrega, erosão de penetração, Taguchi, modelos de maquinagem.



# Abstract

The Plastic Injection Mold Industry in Portugal is a sector that has been growing and gaining international projection in the last decades. It is an industry driven by external demand and recognized worldwide for quality and competitiveness. With an increasingly dynamic market where “time is money”, accomplish customer lead times is seen as a crucial point in the entire process. To achieve this goal, it is necessary to optimize the production processes in order to obtain the highest possible productivity, consequently reducing the delivery time and even enabling better prices for the product.

It is in this sense that this dissertation studies the process of penetration erosion in order to optimize one of the most time consuming and costly processes of the machining phase of a mold.

A brief introduction was made in which the objectives of the dissertation are presented and a little of the history of the design of experiments.

This is followed by the history of the mold industry sector in Portugal, the mold is described and the main stages it goes through in its production. A brief explanation of these phases is also given, giving greater emphasis to the machining phase, specifically to erosion processes. The following chapter explains Taguchi's method and its application to electroerosion.

Then we move to the planning of the trials where the quality characteristics that we want to study are identified, the parameters to be optimized from among the possible ones always identified in view of the quality characteristics to improve. The Taguchi method is applied and the trials are performed.

With the obtained results an analysis is made and proposed machining models that are also tested and the appropriate conclusions are drawn.

**Keywords:** plastic injection molds, lead times, penetration erosion, Taguchi, machining models.



# Índice de Matérias

1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos da Dissertação .....	1
1.2 História do desenho de Experiências.....	4
2 Enquadramento.....	5
2.1 A Indústria dos Moldes .....	5
2.2 O Molde.....	6
2.3 Fase de Projeto .....	9
2.4 Fase de Maquinagem.....	10
2.5 Processo de Erosão .....	12
2.6 Erosão de Penetração.....	13
2.7 Erosão de Fio.....	16
2.8 Micro Furação .....	17
3 Métodos Taguchi.....	19
3.1 Metodologia Taguchi .....	19
3.2 Metodologia Taguchi aplicada à Eletroerosão .....	23
4 Planeamento de Ensaios .....	25
4.1 Determinação das características de qualidade .....	25
4.2 Determinar os métodos de medição das características de qualidade .....	26
4.3 Escolha das matérias-primas .....	26
4.4 Identificação dos parâmetros de corte .....	27
4.5 Escolha e definição dos níveis e valores adequados.....	39
4.6 Aplicação dos métodos de Taguchi.....	41
4.7 Equipamentos utilizados.....	43
5 Ensaios .....	47
6 Análise de resultados.....	55
7 Conclusões e Trabalhos Futuros.....	69
Referências Bibliográficas: .....	71

Anexos.....	73
Anexo I Programa CAM de maquinagem dos provetes na erosão por fio .....	73
Anexo II Certificado de tratamento térmico efectuado no aço DIN: X40 CrMoV5-1, M.nº: 1.2344 .....	74
Anexo III Resumo produtivo dos processos de Fresagem e Erosão.....	75
Anexo IV Exemplo de programa CAM de chamada de parâmetros de erosão de penetração .....	80
Anexo V Exemplo de programa CAM com parâmetros de maquinagem.....	81
Anexo VI Fichas técnicas dos aços utilizados no estudo .....	83
Anexo VII Tabela de resultados obtidos para o aço pré tratado 1.6582.....	85
Anexo VIII Tabela de resultados obtidos para o aço temperado 1.2344.....	87
Anexo IX Gráficos e respetivas Tabelas de análise de resposta média e S/N para o Desgaste do elétrodo no aço 1.6582 .....	89
Anexo X Gráficos e respetivas Tabelas de análise de resposta média e S/N para Ra no aço 1.6582 .....	90
Anexo XI Tabelas de análise de variâncias ANOVA no aço 1.6582 .....	91
Anexo XII Gráficos e respetivas Tabelas de análise de resposta média e S/N para a Taxa de Remoção de Material no aço 1.2344.....	92
Anexo XIII Gráficos e respetivas Tabelas de análise de resposta média e S/N para o Desgaste do elétrodo no aço 12344. ....	93
Anexo XIV Gráficos e respetivas Tabelas de análise de resposta média e S/N para Ra no aço 1.2344 .....	94
Anexo XV Tabelas de análise de variâncias ANOVA no aço 1.2344.....	95



## Índice de Tabelas

Tabela 2.6.1 – comparativo entre o processo de fresagem e erosão.....	15
Tabela 4.4.1 - condições elétricas de maquinagem .....	27
Tabela 4.4.2 - condições de movimentos de maquinagem.....	27
Tabela 4.4.3 – Correspondência de parâmetro máquina com o valor nominal de ON.....	29
Tabela 4.4.4 – Correspondência direta do parâmetro OFF.....	29
Tabela 4.4.5 – Correspondência do parâmetro máquina com o valor nominal combinado com V.....	31
Tabela 4.4.6 Correspondência do parâmetro máquina com o valor nominal de V .....	31
Tabela 4.4.7 Correspondência de V com o parâmetro IP na determinação do valor da corrente.....	31
Tabela 4.4.8 Correspondência parâmetro máquina / valor nominal de SV e efeito consequente. ....	32
Tabela 4.4.9 Correspondência do parâmetro máquina com o valor nominal de “C” .....	33
Tabela 4.4.10. Correspondência do parâmetro máquina com o valor nominal de “UP” .....	35
Tabela 4.4.11 Valores que “LNM” pode assumir e suas consequências geométricas. ....	37
Tabela 4.4.12. Correspondência do parâmetro máquina “LS” com o movimento que provoca. ....	37
Tabela 4.4.13 Correspondência do parâmetro máquina “LNM” com o movimento que provoca. ....	38
Tabela 4.5.1 Parâmetros possíveis e seleção de níveis.....	39
Tabela 4.5.2 Parâmetros a otimizar .....	40
Tabela 4.5.3 Parâmetros contantes em todos os ensaios .....	40
Tabela 4.6.1 Matriz Taguchi L18 com níveis a utilizar .....	41
Tabela 4.6.2 Matriz Taguchi L18 com parâmetros utilizados.....	42
Tabela 5.1 Resultados dos ensaios realizados no aço 1.6582 (pré tratado).....	51
Tabela 5.2 Resultados dos ensaios realizados no aço 1.2344 (temperado) .....	52
Tabela 6.1 Valores da transformação de dados para as respostas médias .....	60
Tabela 6.2 Níveis que maximizam a TRM por análise de S/N .....	60
Tabela 6.3 Valores da transformação de dados para a razão S/N médios no aço 1.6582.....	61
Tabela 6.4 Níveis que maximizam a TRM pela razão sinal-ruído no aço 1.6582.....	61
Tabela 6.5 Resumo de melhores níveis para os parâmetros de maquinagem analisados pelas médias e S/N no aço 1.6582 .....	62
Tabela 6.6 Melhores níveis ajustados para o aço 1.6582 .....	63
Tabela 6.7 Níveis ótimos para o modelo de maquinagem.....	64
Tabela 6.8 Modelo de maquinagem com parâmetros máquina.....	64
Tabela 6.9 Resultados dos ensaios de confirmação no aço 1.6582 .....	66
Tabela 6.10 Resumo de melhores níveis para os parâmetros de maquinagem analisados pelas médias e S/N no aço 1.2344 .....	67

Tabela 6.11 Melhores níveis ajustados para o aço 1.2344 .....	67
Tabela 6.12 Modelo de maquinagem com parâmetros máquina .....	67
Tabela 6.13 Resultados dos ensaios de confirmação no aço 1.2344 .....	68

# Índice de Figuras

Figura 2.1.1- Exemplo de Fresadora Ferramenteira (convencional- esquerda) e Centro de maquinagem CNC (direita).....	5
Figura 2.2.1 –Exemplo de Molde e respetiva peça injetada.....	6
Figura 2.2.2 –Ilustração de um Ciclo de Injeção.....	7
Figura 2.2.3 –Diagrama de etapas do processo de fabrico de moldes.....	7
Figura 2.2.4 – Gráfico comparativo entre tempos de maquinagem de fresagem e EDM.....	8
Figura 2.3.1 – Exemplo de desenho preliminar 2D.....	9
Figura 2.3.2 – Exemplo de desenho final 3D.....	9
Figura 2.4.1 – Exemplo de peça na fase de furação (esquerda) e fresagem de desbaste (direita).....	10
Figura 2.4.2 – Exemplo de peça na fase de fresagem de acabamento.....	11
Figura 2.4.3 Exemplo de bucha antes da montagem de postigos, elementos moveis e balancés. ....	11
Figura 2.4.4 Postigos, elementos moveis e balancés antes da montagem. ....	12
Figura 2.4.5 Bucha depois da montagem de postigos, elementos moveis e balancés. ....	12
Figura 2.5.1 – Exemplo de peça antes e depois de executada a textura por erosão .....	13
Figura 2.6.1 – Exemplo de peça antes do processo de erosão de ranhura (rib), pormenor à direita. ....	14
Figura 2.6.2 – Exemplo de peça durante o processo de erosão de ranhura (rib).....	14
Figura 2.7.1 Exemplo de máquina de erosão por fio.....	16
Figura 2.8.1 Exemplo de máquina de micro furação.....	17
Figura 3.1.1 Esquema de um processo genérico .....	19
Figura 3.2.1 Exemplo de máquina de erosão de penetração “convencionais” .....	23
Figura 3.2.2 Erosão de penetração CNC Sodick AQ35L utilizada nos ensaios. ....	24
Figura 4.4.1 - esquema polaridade elétrica.....	28
Figura 4.4.2 – Forma da onda de descarga elétrica.....	30
Figura 4.4.3 Representação do movimento de salto e correspondência com UP/DN. ....	35
Figura 4.4.4 Padrões de movimento alterados pelo parâmetro “JM” .....	36
Figura 4.7.1 Sodick A535.....	43
Figura 4.7.2 Punções de marcação de números.....	43
Figura 4.7.3 Retificadora plana ELB.....	44
Figura 4.7.4 Sodick AQ35 L .....	44
Figura 4.7.5 Balança utilizada nas medições de peso .....	45
Figura 4.7.6 Rugosímetro Tesa Rugosurf 20.....	45
Figura 4.7.7 Microscópio digital Accud DM200 .....	46
Figura 5.1 Corte dos provetes por erosão de fio e programação CAM.....	47

Figura 5.2 Exemplo de provete depois de puncionado e retificado.....	47
Figura 5.3 Retificação dos provetes .....	48
Figura 5.4 Programação CAM da fresagem do gabarito de centragem dos provetes.....	48
Figura 5.5 Gabarito de centragem .....	49
Figura 5.6 Modelação e programação dos eléctrodos em grafite.....	49
Figura 5.7 Exemplo de maquinagem instável .....	51
Figura 5.8 Gráfico das rugosidades Ra, Rz e razão Ra/Rz.....	53
Figura 6.1 Exemplo de eléctrodo com erupção, vista de topo e perfil.....	55
Figura 6.2 Exemplo de eléctrodo com cratera, vista de topo e perfil.....	56
Figura 6.3 Gráfico comparativo da TRM nos aços utilizados.....	57
Figura 6.4 Gráfico comparativo do DE nos aços utilizados .....	58
Figura 6.5 Gráfico comparativo de Ra nos aços utilizados .....	58
Figura 6.6 Gráfico comparativo entre a TRM e Ra nos aços utilizados.....	59
Figura 6.7 Gráfico do efeito nas médias da TRM no aço 1.6582.....	60
Figura 6.8 Gráfico do efeito no S/N da TRM no aço 1.6582 .....	61
Figura 6.9 Exemplo de maquinagem com arco eléctrico .....	65
Figura 6.10 Provete de ensaios de confirmação no aço 1.6582 .....	65
Figura 6.11 Eléktrodos dos ensaios de confirmação no aço 1.6582.....	66
Figura 6.12 Provete de ensaios de confirmação no aço 1.2344 .....	68
Figura 6.13 Eléktrodos dos ensaios de confirmação no aço 1.2344.....	68

# Nomenclaturas

DOE- Design of Experiments (Desenho de Experiências)

CAD - Computer-Aided Design

CAM - Computer-Aided Manufacturing

CAE – Computer-Aided Engineering

EDM – Electric Discharge Machining, (Maquinagem por Descarga Elétrica)

WEDM – Wire Electric Discharge Machining (Eletroerosão por Fio)

TRM - taxa de remoção de material ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

PIP - Peso Inicial do Provete medido em grama (g)

PFP - Peso Final do Provete medido em grama (g)

PR - Peso Removido ao provete calculado em grama (g)

PIE - Peso Inicial do Eléctrodo medido em grama (g)

PFE - Peso Final do Eléctrodo medido em grama (g)

DE – Desgaste do Eléctrodo calculado em grama (g)

$\sigma$  – Desvio padrão amostral

$\overline{Ra}$  – média aritmética das observações de  $Ra$

$\overline{Rz}$  – média aritmética das observações de  $Rz$

GL – grau de liberdade



# 1 Introdução

## 1.1 Objetivos da Dissertação

Esta dissertação tem como objetivo a otimização de parâmetros de maquinagem de erosão de penetração (EDM), minimizando o tempo de execução, o desgaste da ferramenta (elétrodo) e a rugosidade superficial obtida na peça a maquinar. Para a redução do tempo de maquinagem será calculada a Taxa de Remoção de Material (TRM), sendo que para este parâmetro, o objetivo final será maximizar e não minimizar, visto este ser a razão entre o volume de material removido e o tempo que este demora a remover. Para além da redução de tempo de maquinagem, a diminuição da rugosidade final obtida permite que o tempo gasto em polimento manual para a redução dessa mesma rugosidade seja também ele reduzido, sendo estes fatores uma mais-valia significativa na produtividade. A redução do desgaste do elétrodo é também um fator importante, pois como veremos adiante reduzirá a repetição de elétrodos no processo produtivo.

Neste estudo apenas será tido em conta as características de qualidade referidas no paragrafo anterior. Existem mais características de qualidade associadas ao processo de erosão igualmente importantes, nomeadamente o rigor e precisão da maquinagem. Considera-se que estas características serão um bom objeto de estudo em trabalhos futuros.

É uma área de investigação ainda pouco explorada existindo alguns estudos académicos sobre o assunto.

Machado, C.M. [1] utilizou o desenho de experiências com análise de resposta em superfície para caracterizar as texturas obtidas por eletroerosão (EDT) em rolos de laminagem de chapa para a indústria automóvel. Conclui que a gama de parâmetros utilizados deveria ser alargada e utilizada uma máquina de erosão de maior porte a fim de melhor compreender os modelos empíricos propostos.

Rajmohan, T. *et al.* [2] publicam um artigo em que utilizam análise de Taguchi para otimizar parâmetros de maquinagem em aço inoxidável (AISI 304) de modo a obter melhorias na taxa de remoção de material (MRR). Neste estudo é utilizada uma máquina onde adaptam uma cabeça rotativa com vedantes, permitindo que o dielétrico flua pelo interior do elétrodo tubular, melhorando a limpeza durante o processo. Processo este em tudo semelhante ao de micro furação largamente utilizado na indústria dos moldes. Têm como variáveis a otimizar o tempo de descarga (“ON time”), tempo de repouso (“OFF time”), Intensidade da corrente (IP) e Tensão da corrente (“voltage”).

Motorcu, A. R. *et al.* [3] utilizam metodologias Taguchi e resposta em superfície para otimizar a taxa de remoção de material e rugosidade da maquinagem de um material compósito (Al/B<sub>4</sub>C/Gr) através do corte por eletroerosão de fio (WEDM).

Merla, C. e D'Urso, G. [4], estudantes italianos, publicam em 2014 um artigo onde estudam a tecnologia de micro furação. Focam-se na influência dos diferentes materiais dos elétrodo e da peça na eficiência do processo. Utilizam para a peça aço inox, titânio, magnésio e latão, e no elétrodo cobre, latão e carboneto de tungsténio.

Barman, S. *et al.* [5], investigadores indianos estudam através de ensaios destrutivos, a qualidade superficial de furos cegos micro furados em materiais como aço de alta resistência ao desgaste (aço de blocos padrão), vidro metálico à base de zircónio, cobre de alta condutividade térmica livre de oxigénio e superligas de alumínio. Utilizam elétrodo em tungsténio e cortam os provetes axialmente para análise na erosão de fio. Utilizam também espectroscopia de raio-X disperso e microscópio de eletrões para analisar o elétrodo e a superfície do furo.

Também no ramo da medicina existem estudos sobre maquinagem por eletroerosão. Stráský, J. *et al.* [6], fazem a caracterização de tratamentos de superfície combinados numa liga de titânio usada no fabrico de próteses. Utilizam EDM, *acid etching* e *shot peening* para fazer a maquinagem e caracterização. Concluem que as superfícies resultantes da combinação destes processos de maquinagem, têm vantagens para a função médica a que o material se destina.

Ntasi, A. *et al* [7], publicam um estudo onde tentam avaliar o efeito da eletroerosão na resistência à corrosão de dois tipos de ligas metálicas usadas no fabrico de implantes dentários. Concluem que a eletroerosão diminui de facto a corrosão nas ligas metálicas em questão, mas aumentam o risco de reações biológicas adversas.

Relativamente à Indústria dos Moldes, Boujeboene, M. *et al* [8] publicam um trabalho com o propósito de estudar a influência dos parâmetros de maquinagem EDM na integridade superficial em dois aços utilizados no fabrico de moldes (X200Cr15 e 50CrV4). Concluem que quando é aumentada a energia da descarga, a instabilidade do processo aumenta, provocando fusão do material, acumulação de partículas entre o elétrodo e a peça e a ocorrência de arcos elétricos com potencial de danificar as superfícies do elétrodo e peça. Em contrapartida, ao diminuir a energia da descarga conseguem-se superfícies menos duras e uma zona de afetação térmica menor. Neste caso as taxas de remoção de material diminuem.

Moita, N. [9], aluno no Instituto Superior Técnico, aplica métodos de Taguchi para estudar a fase de testes de um molde. Tem como objetivo a sistematização dos testes, redução de tempo, independência do operador e normalização de tarefas. Conclui que o método de Taguchi é aplicável para a injeção de plástico em moldes e obteve melhorias significativas na qualidade final das peças injetadas.

Dias, T. [10], estudante do Instituto Politécnico de Bragança, analisa o efeito da variação de quatro parâmetros de corte em fresagem na rugosidade obtida num aço 1.2738. Para isso faz uso dos métodos



de Taguchi e de resposta em superfície para encontrar a combinação ótima de parâmetros que reduzem a rugosidade da peça maquinada.

Gonçalves, C. [11], estudante da FEUP, estudou novas técnicas e ferramentas de execução para a fase de montagem final do molde, também chamada na indústria de sector das bancadas. Por ser a última fase de toda a conceção do molde, também é um sector bastante importante onde o tempo de execução é crucial. Gonçalves esquematiza todas as operações efetuadas pelas bancadas, identificando os pontos críticos e propondo possíveis soluções para otimizar os processos. Consegue melhorias muito significativas reduzindo muito os tempos de execução das tarefas e consequentemente o tempo total de montagem e ajuste do molde.

Destes exemplos se conclui que a investigação feita na maquinagem por eletroerosão é focada em materiais e aplicações que não são os mais utilizados na Indústria dos Moldes de Injeção. Também se observa que a investigação feita nesta Indústria não diz respeito ao processo produtivo de erosão.

Este trabalho foi desenvolvido em parceria com a empresa Moldes Catarino situada na Marinha Grande. É uma empresa de renome com 38 anos de atividade no sector e especializada na conceção e produção de moldes de precisão em aço para a indústria dos plásticos. Todos os equipamentos e materiais necessários para a execução deste trabalho foram cedidos pela empresa.

Nesta Dissertação pretende-se estudar a melhoria do processo de erosão de penetração nos materiais e aplicações mais comuns à indústria em questão, gerando assim uma melhoria na produtividade das empresas. Através dos métodos de análise de Taguchi escolhem-se os parâmetros mais significativos de todos os possíveis, de seguida aplicam-se modelos matemáticos que permitam prever os parâmetros ótimos de maquinagem para a obtenção da maior taxa de remoção de material e melhor acabamento superficial.

## 1.2 História do desenho de Experiências

O desenvolvimento dos métodos clássicos de Desenho Estatístico de Experiências (DOE) remonta ao início do século passado em Inglaterra no sector da agricultura. O responsável de então pelo tratamento estatístico de dados no “Rothamsted Agricultural Experimental Station”, Sr. Ronald A. Fisher identificou problemas nos métodos utilizados e em parceria com investigadores e cientistas desenvolveu as metodologias aplicadas na investigação feita no sector agrícola, tendo publicado dois livros muito influentes no uso da estatística neste sector[12].

Após a segunda guerra mundial o Japão encontrava-se numa enorme crise financeira e de recursos, pelo que a necessidade de desenvolvimento industrial imperava. A indústria necessitava de rápidos avanços e melhorias nos seus processos de fabrico para colmatar a escassez de matérias-primas e capital. Neste contexto o Dr. Genichi Taguchi tendo um profundo conhecimento em estatística e matemática avançada desenvolve técnicas experimentais de projeto e produção. [13]

Em meados da década de 80, o Dr. Genichi Taguchi propõe uma metodologia de desenho de experiência que desperta o interesse dos investigadores. Taguchi utiliza o que nomeia de “desenho robusto de parâmetros” para planear experiências de forma mais eficaz e sucinta.

O principal objetivo dos chamados “métodos de Taguchi” é o de melhorar a qualidade de um processo ou produto através da otimização dos parâmetros controláveis, tornando o menos significativos possível os parâmetros não controláveis. Recorrendo ao desenho de fatoriais fracionados e matrizes compostas por vetores ortogonais executa-se apenas uma fração das combinações de parâmetros de entrada possíveis limitando em muito o número de testes a realizar. Através desta filosofia de planeamento de experiências a qualidade do produto é medida recorrendo a uma pequena amostra cuja variância é bastante elevada em relação à qualidade final pretendida. Idealmente teriam que ser feitos testes para todas as combinações de parâmetros possíveis, o que tornaria a tarefa impraticável, demorada e dispendiosa.

## 2 Enquadramento

### 2.1 A Indústria dos Moldes

A produção de moldes para injeção de plástico em Portugal teve início em meados dos anos 40 na Marinha Grande, tornando-se num sector importante economicamente e reconhecido internacionalmente pela qualidade dos seus produtos, fornecendo grandes multinacionais em todo o mundo nas mais diversas áreas (indústria automóvel, eletrónica, comunicações, utensílios domésticos, etc). O sector conta com mais de 500 empresas, na sua maioria PMEs, situadas principalmente na Marinha Grande e Oliveira de Azeméis, empregando mais de 8000 trabalhadores, exportando perto de 90% de sua produção.

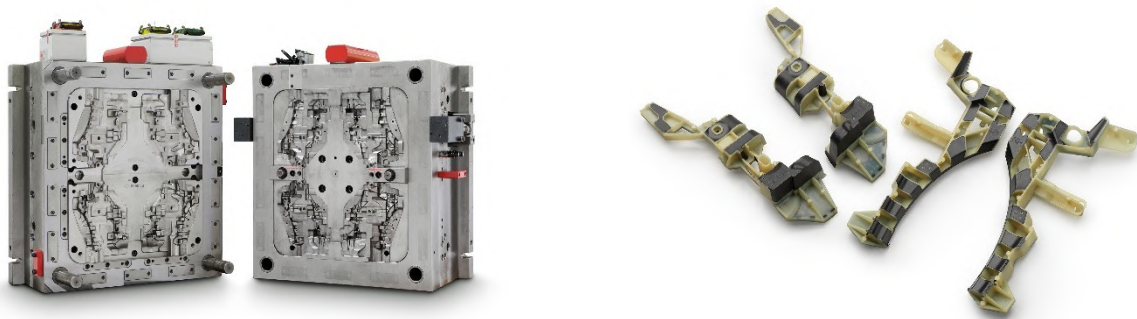
É uma indústria situada na vanguarda dos desenvolvimentos tecnológicos, recorrendo a máquinas convencionais (manuais), máquinas com controlo numérico computadorizado (CNC) (Figura 2.1.1) e softwares CAD/CAM/CAE na execução dos seus projetos.[14]



*Figura 2.1.1- Exemplo de Fresadora Ferramenteira (convencional- esquerda) e Centro de maquinagem CNC (direita)*

## 2.2 O Molde

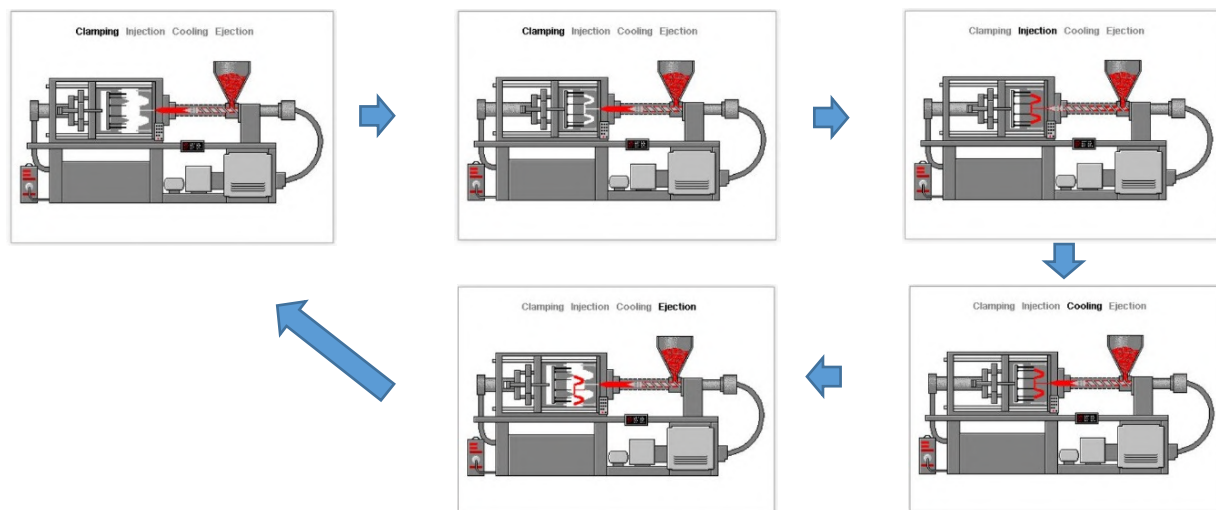
Na atualidade é difícil pensar em coisas que não possam ser fabricadas em plásticos ou pelo menos conter na sua composição partes em plástico. Desde eletrodomésticos a brinquedos, automóveis a bicicletas, computadores a canetas, (citando apenas alguns exemplos) todos estes objetos são constituídos ou têm na sua constituição peças plásticas. Peças essas que na sua maioria são fabricadas através de ferramentas especializadas para o efeito e designadas de Moldes (Figura 2.2.1). São ferramentas bastante complexas e por isso únicas, na medida em que mesmo produzindo dois moldes “iguais” existirão sempre diferenças, mais ou menos subtis, entre eles. São ferramentas com um ciclo de vida bastante alargado, podendo dependendo da necessidade, produzir milhões de peças.



*Figura 2.2.1 –Exemplo de Molde e respetiva peça injetada.*

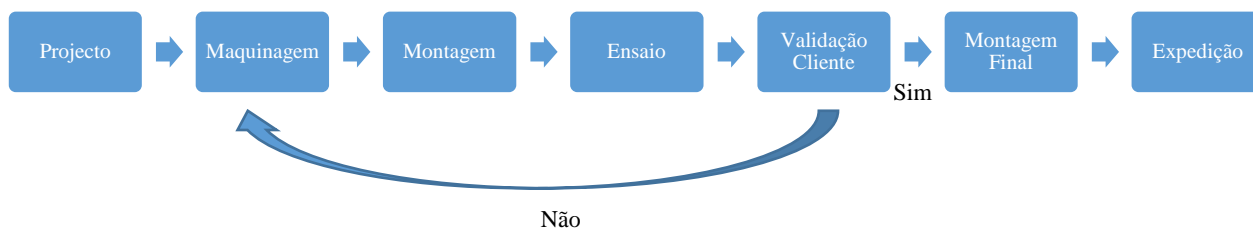
Um molde de injeção de plástico consiste num conjunto de componentes metálicos projetados para que no seu interior (zonas moldantes) seja injetado material plástico no estado líquido ou pastoso a altas pressões e temperaturas de modo a obter a geometria desejada.

Genericamente um molde divide-se em duas partes principais, lado fixo e lado móvel (correspondente lado da “cavidade” e lado da “bucha”). Esta designação advém da própria conceção das máquinas injetoras, visto uma das partes (normalmente o lado onde é injetado o plástico, “cavidade”) estar fixa, e o lado oposto (onde se executa a extração da peça final, “bucha”) ser móvel. Durante o processo de injeção os dois lados do molde são fechados sendo exercida elevada pressão (a pressão depende da área projetada da peça a injetar), é então injetado o plástico a elevada temperatura e pressão, é arrefecido para que volte ao estado sólido, e é aberto para que se dê a extração da peça. O molde volta a fechar repetindo o ciclo (Figura 2.2.2).



**Figura 2.2.2 –Ilustração de um Ciclo de Injeção[15]**

O fabrico do molde é um processo moroso e complexo, composto por várias fases, sendo estas projeto, maquinagem dos componentes, montagem e ajustamento de todos os componentes, ensaio, ajustes finais, novo ensaio caso necessário e expedição para o cliente. Desde a fase do 1º ensaio até à expedição para o cliente o processo torna-se iterativo sendo por vezes necessário reajustes, re-maquinagens, possíveis alterações requeridas pelo cliente e novos ensaios até que o cliente aprove o Molde para expedição (Figura 2.2.3).



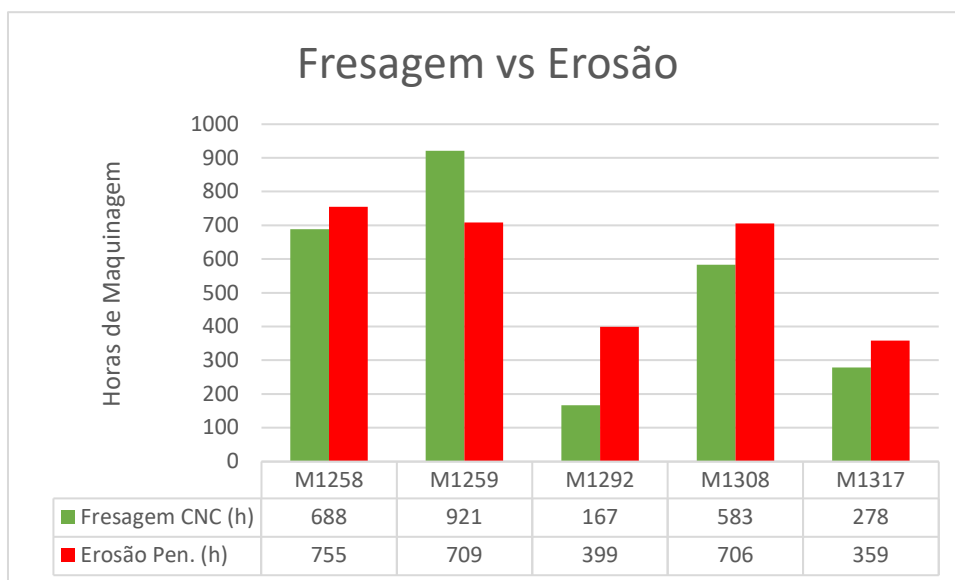
**Figura 2.2.3 –Diagrama de etapas do processo de fabrico de moldes**

Atualmente este sector é bastante competitivo, isto é, é necessário fazer mais, mais barato e mais rápido, mantendo o padrão de qualidade que distingue o sector dos moldes em Portugal dos demais. Os fatores chave para o cliente são a qualidade, prazo de entrega e preço. É por isso imperativo reduzir os tempos de execução das tarefas inerentes ao processo de forma a conseguir cumprir ou até reduzir os prazos de entrega.

Tendo em conta apenas os processos de maquinagem, podemos perceber que todos eles têm relevâncias diferentes isto porque os tempos de execução, o preço dos consumíveis utilizados e a precisão requerida são diferentes entre eles.

Analizando os tempos de maquinagem das zonas moldantes em cinco moldes semelhantes executados na empresa Moldes Catarino facilmente se conclui que o processo de erosão tem enorme relevância no tempo total de execução (Figura 2.2.4). Apenas em um molde se verifica tempo totais de fresagem superiores à erosão de penetração. Note-se que na fresagem CNC são consideradas as operações Desbaste CNC, Fresagem CNC e Acabamentos CNC enquanto que na Erosão de Penetração são consideradas as operações de Modelação de eléctrodos, Fresagem de eléctrodos e Erosão de Penetração (anexo I) e respetivos tempos de preparação de trabalho (set-up) em todas elas. São estas as operações consideradas internamente na empresa em cada um dos processos produtivos. Também nos consumíveis utilizados em cada processo, mais uma vez a erosão é relevante. No caso da fresagem de aço apenas são utilizadas fresas integrais em metal duro ou pastilhas como consumível, já no caso da erosão de penetração são utilizadas fresas e pastilhas revestidas a diamante o que as torna bastante mais dispendiosas e grafite para a execução dos eléctrodos.

Por estes motivos a erosão de penetração é um processo que ao ser otimizado causará um impacto positivo na indústria dos moldes, reduzindo os tempos de maquinagem e assim aumentando a competitividade das empresas do sector.



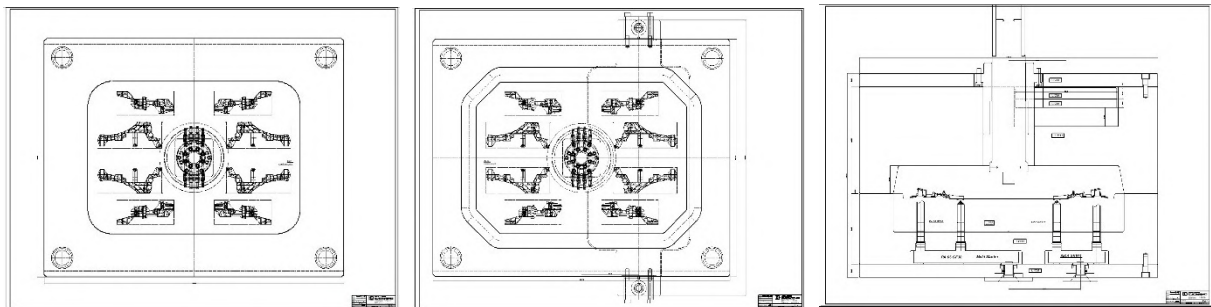
**Figura 2.2.4 – Gráfico comparativo entre tempos de maquinagem de fresagem e EDM**

## 2.3 Fase de Projeto

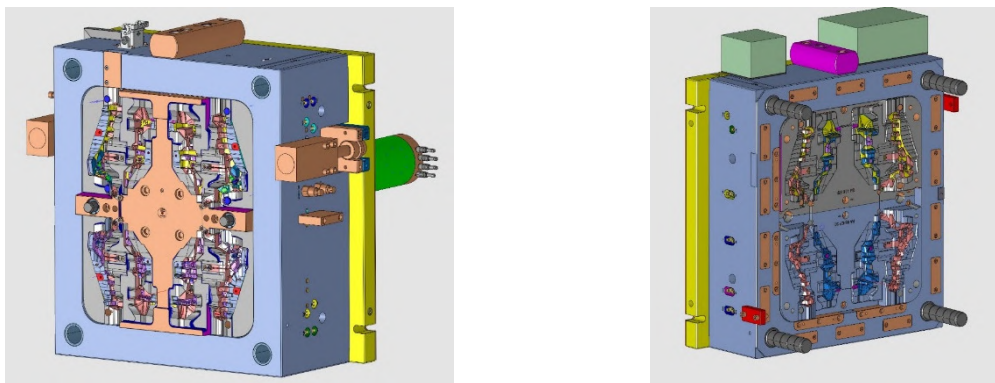
Passado o processo de orçamentação e adjudicação por parte do cliente inicia-se a fase de projeto. Nesta fase é feito um desenho preliminar em que são definidas as medidas gerais dos aços e todos os mecanismos necessários ao correto funcionamento do molde. No passado tanto o desenho preliminar como do desenho final era executado em 2D em papel e à mão, visto ser o recurso disponível para o fazer. Com a evolução tecnológica foi introduzida o desenho 3D recorrendo a software CAD estando o desenho em papel a cair em desuso. No entanto o desenho 2D ainda é utilizado na fase de desenho preliminar (Figura 2.3.1) e em alguns componentes cujos processos de maquinagem são convencionais/manuais.

Após a aprovação do desenho preliminar pelo cliente iniciam-se as compras de aços e prossegue-se para o desenho final 3D (Figura 2.3.2) onde são projetados os mecanismos em detalhe e todos os restantes sistemas (circuito de refrigeração, circuito de óleos, sistema de injeção, etc.).

Nesta fase começam a ser executadas algumas maquinações.



*Figura 2.3.1 – Exemplo de desenho preliminar 2D*



*Figura 2.3.2 – Exemplo de desenho final 3D*

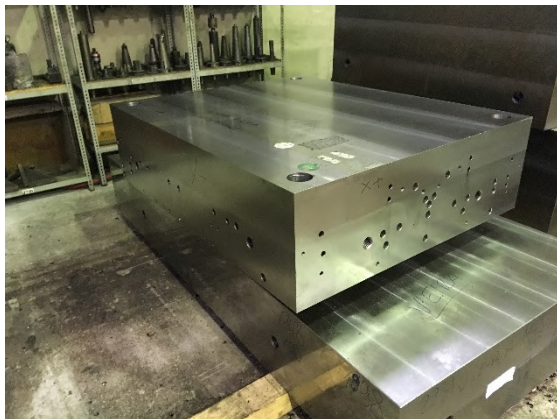


## 2.4 Fase de Maquinagem

A maquinagem de todos os componentes inerentes ao molde (estrutura, zonas moldantes, elementos móveis, postigos, etc) segue um procedimento idêntico na maioria dos casos.

Tomando como exemplo uma zona moldante com dimensões consideráveis (ex. 900x1200 mm), é selecionado o material (na fase de projeto), cortado e galgado aproximando a sua forma a um paralelepípedo e às suas dimensões finais. De seguida passa por um processo de furação e fresagem de desbaste por arranque de apara aproximando mais a sua forma à geometria final pretendida (Figura 2.4.1). Dependendo dos casos a peça seguirá para tratamentos térmicos.

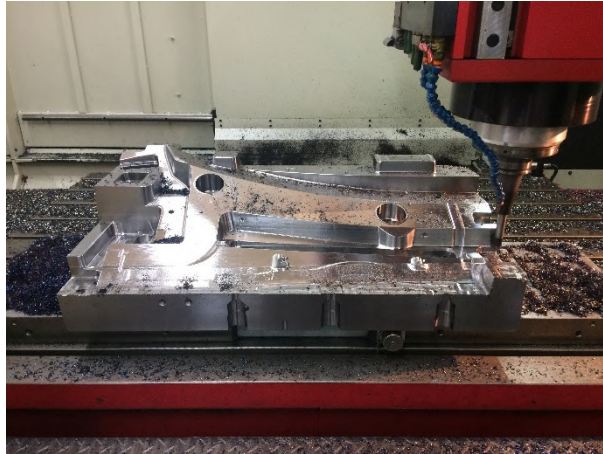
Depois são retificadas algumas superfícies que requerem esse processo (normalmente planas), ficando estas (caso a geometria o permita) nas suas dimensões finais, e permitindo um melhor aperto e centragem nas operações adjacentes.



*Figura 2.4.1 – Exemplo de peça na fase de furação (esquerda) e fresagem de desbaste (direita)*

A peça encontra-se então pronta para maquinagens de acabamento (Figura 2.4.2). Atualmente estas operações são executadas por máquinas fresadoras CNC (Computer Numeric Control) recorrendo a software CAM (Computer-Aided Manufacturing) para a programação das fresagens e furações concebidas na fase de projeto.

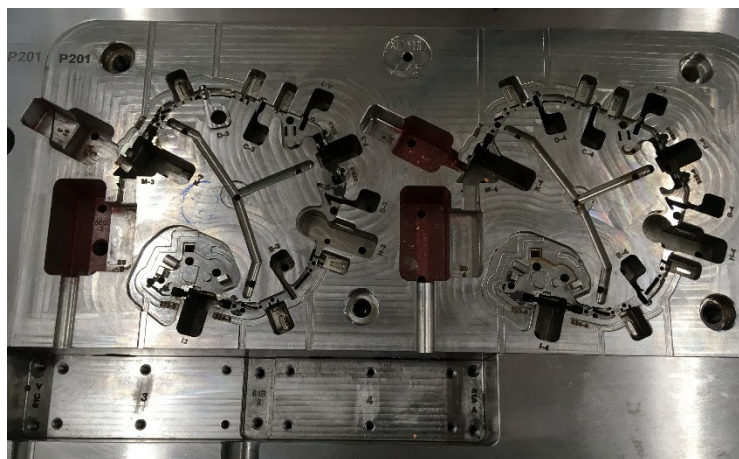




*Figura 2.4.2 – Exemplo de peça na fase de fresagem de acabamento*

Após a fresagem recorre-se ao processo de erosão de penetração (EDM) e fio (WEDM) nas zonas de difícil ou inexecutável maquinação por fresagem. É sobre esta tecnologia que a Dissertação irá ser desenvolvida.

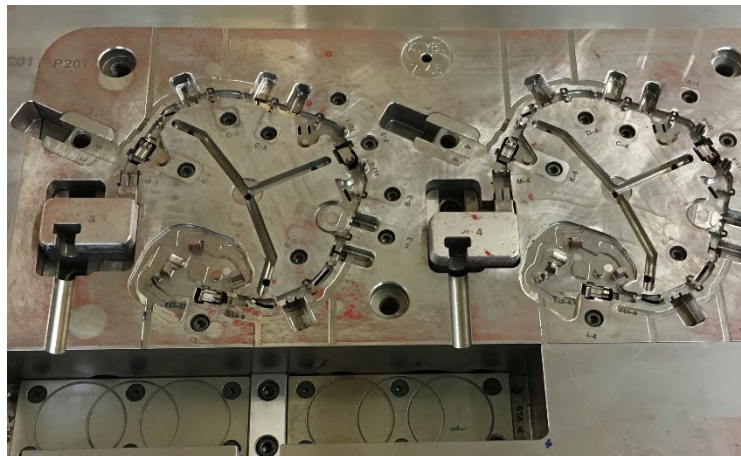
Após a conclusão de todas estas operações as peças seguirão para a fase de montagem e ajustes (Figura 2.4.3). Nesta fase são montados todos os componentes (Figura 2.4.4) e feito os ajustamentos necessários para o correto funcionamento do molde (Figura 2.4.5).



*Figura 2.4.3 Exemplo de bucha antes da montagem de postigos, elementos moveis e balancés.*



*Figura 2.4.4 Postiços, elementos moveis e balancés antes da montagem.*



*Figura 2.4.5 Bucha depois da montagem de postiços, elementos moveis e balancés.*

## 2.5 Processo de Erosão

Eletroerosão é uma tecnologia de maquinagem de metais amplamente utilizada nos mais variados ramos industriais. Esta tecnologia consiste na remoção de material através de energia térmica produzida pela passagem de corrente pulsada entre um eléctrodo e a peça a maquinar, tendo como objetivo texturizar a superfície, mas também de remover grandes quantidades de material independentemente da dureza do mesmo.

É por isso utilizada no fabrico de rolos para laminar chapa dando-lhes a textura desejada [1]. Na indústria dos moldes para plástico é uma alternativa à fresagem pois permite a maquinação de formas impossíveis ou dificilmente obtidas por arranque de apara ou outro tipo de tecnologia. É também utilizada na texturização de superfícies dependendo das especificações requeridas pelo cliente (Figura 2.5.1).



*Figura 2.5.1 – Exemplo de peça antes e depois de executada a textura por erosão*

Inicialmente a vertente mais comum na indústria dos moldes era erosão de penetração (EDM) mas com o desenvolvimento das tecnologias CNC surgem novas variantes tais como eletroerosão por fio (WEDM-wire electrical discharge machining) e micro furação.

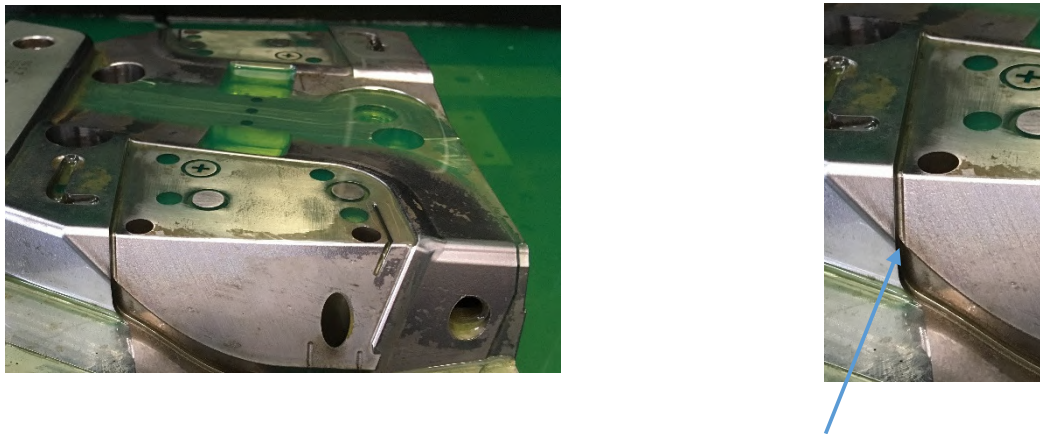
## **2.6 Erosão de Penetração**

Eletroerosão de penetração consiste na remoção de material através de energia térmica proveniente da faísca produzida pela passagem pulsada de corrente elétrica no espaço existente entre um eletrodo e a peça (GAP), estando estes submersos num fluido dielétrico. O fluido dielétrico atua como um isolante entre o eletrodo e a peça até que o potencial elétrico seja suficiente para que a corrente seja imposta. Atua também como agente de limpeza dos detritos resultantes da maquinação. Esta passagem de corrente forma um plasma que aquece e derrete o material. Quando a passagem de corrente é interrompida permite que o fluido dielétrico circule limpando a superfície dos detritos resultantes[16]. Este ciclo repete-se até que o volume de material removido seja o pretendido, e a forma do eletrodo seja reproduzida na peça (a geometria resultante na peça a maquinar é o negativo da geometria do eletrodo, tendo em conta o desgaste do eletrodo). Importa referir que esta tecnologia de maquinação surge como alternativa à fresagem, pois permite a realização de geometrias difíceis ou mesmo impossíveis de executar por arranque de apara (Figura 2.6.1 ; Figura 2.6.2).

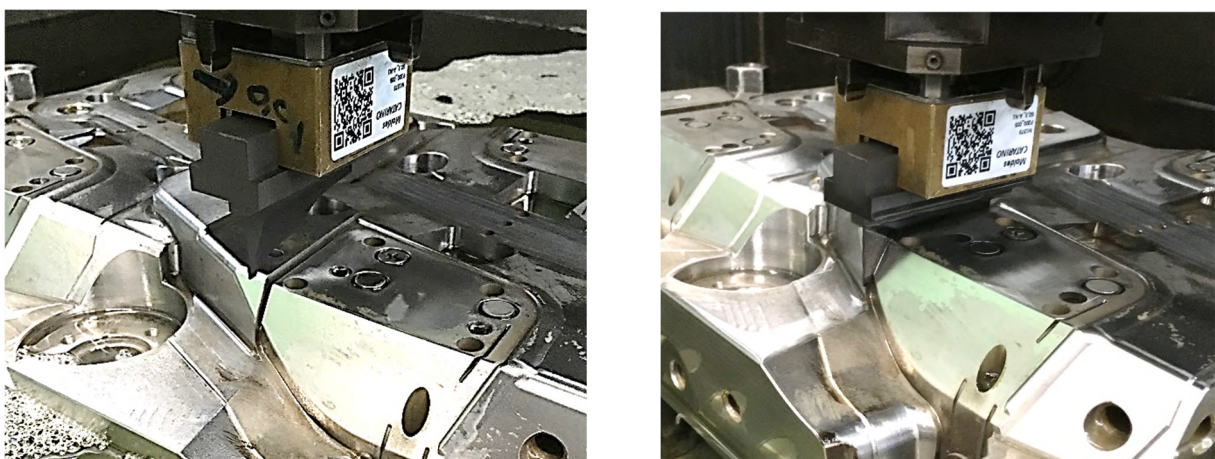


Ao contrário da fresagem, na erosão não existe contacto entre a ferramenta (elétrodo) e a peça. O espaço existente entre o elétrodo e a peça é ocupado pela faísca. A espessura da faísca pode variar com os parâmetros de maquinação. Assim sendo a máquina tem que executar orbita durante a maquinação de modo a cumprir as cotas da geometria pretendida (capítulo 4.4 – LNS, STEP, JM, LNM). Este movimento apenas intervém no rigor e precisão das cotas a executar, e por isso não é uma característica que seja objeto de estudo neste trabalho.

Durante a maquinação o elétrodo sofre desgaste inerente ao processo pelo que a geometria obtida no final da erosão pode já não ser a geometria inicial do elétrodos e a pretendida. Por isso na maioria dos casos são fresados vários elétrodos iguais. A erosão consecutiva desses vários elétrodos garante que no final é obtida a forma que se pretende, dentro das tolerâncias pretendidas.



*Figura 2.6.1 – Exemplo de peça antes do processo de erosão de ranhura (rib), pormenor à direita.*



*Figura 2.6.2 – Exemplo de peça durante o processo de erosão de ranhura (rib)*

Devido ao carácter da operação, esta impõe que as superfícies maquinadas fiquem com rugosidades elevadas, que no caso dos moldes e na maioria das vezes tem de ser reduzida através de polimento, excetuando os casos em que o objetivo final da maquinagem é atribuir textura. Com os parâmetros utilizados atualmente e para que os tempos de execução não sejam demasiado elevados, obtêm-se rugosidades de superfície na ordem dos 30 VDI ( $Ra \approx 3.2\mu m$ ), o que implica custos avultados em polimento para a redução da mesma.

É um processo demorado e dispendioso em comparação com a fresagem no aço visto ter implícitas mais operações para a sua execução. Enquanto na fresagem apenas se recorrem a operações de “set up” (aperto, desempenho e centragem) da peça, programação (CAM) e consequente execução dos programas de fresagem, na erosão de penetração os elétrodo terão que ser modelados a partir da peça a erodir (CAD), programadas as fresagens e maquinados, fazer verificação dimensional dos mesmo, executar o “set up” tanto dos elétrodo como da peça a maquinar e ainda proceder á programação (CAM) de erosão e respetiva execução (Tabela 2.6.1). Facilmente se percebe que é um processo produtivo dispendioso e no qual são gastos bastantes recursos. No entanto é um processo bastante importante na indústria dos moldes e que poderá gerar significativos aumentos de produtividade e consequentemente na competitividade das empresas caso seja otimizado, por esse motivo esta Dissertação será direcionada para a otimização dos parâmetros de maquinagem de erosão de penetração.

No comparativo abaixo podemos perceber que o número de operações da fresagem (4 operações) é bastante mais reduzido que o da erosão (9 operações).

***Tabela 2.6.1 – comparativo entre o processo de fresagem e erosão***

Fresagem	Erosão
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Fase projecto - Desenho</li> <li>•Programação da fresagem (CAM)</li> <li>•Set Up de peça e Ferramentas de corte</li> <li>•Execução de programas CAM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Fase projecto - Desenho</li> <li>•Modelação de elétrodo</li> <li>•Programação das fresagens dos elétrodo</li> <li>•Set up de material para executar os elétrodo (grafite ou cobre) e ferramentas de corte.</li> <li>•Execução dos programas de fresagem</li> <li>•Controlo dimensional dos elétrodo</li> <li>•Set up da peça e elétrodo para erosão</li> <li>•Programação da erosão (CAM)</li> <li>•Execução dos programas de erosão</li> </ul>

## 2.7 Erosão de Fio

Eletroerosão de fio (WEDM-wire electrical discharge machining) é uma tecnologia em muito semelhante com erosão de penetração no que toca a parâmetros elétricos, no entanto neste processo o eletrodo é um fio normalmente de latão que atravessa a peça a maquinar.

O fio utilizado neste processo tem um diâmetro que pode variar de 0.02mm até 0.3mm sendo o diâmetro mais utilizado o de 0.25mm por ser o mais vantajoso em termos económicos e de rendimento. Este produto é fornecido em diversas matérias, tais como cobre, latão, fio revestido a zinco, molibdénio entre outros, no entanto o mais versátil e económico é o latão e por isso o mais utilizado[17].

Nesta tecnologia as máquinas (Figura 2.7.1) são equipadas com uma cabeça superior e uma inferior e a peça é posicionada entre as duas cabeças e submersa em fluido dielétrico, que no caso é água desionizada. Faz-se passar o fio da cabeça superior para a inferior estando este sempre a ser desenrolado de uma bobina durante a execução dos programas, é aplicada uma descarga elétrica entre o fio e a peça (semelhante à erosão de penetração) e as cabeças deslocam-se nos eixos X e Y cortando na peça a geometria pretendida. No caso da maquinagem ser de uma matriz, o fio terá que atravessar a peça num furo previamente existente, no caso oposto, maquinagem de um punção, o fio poderá iniciar o corte da parte exterior da peça.

Nas maquinagens de matrizes, se a peça for num aço temperado e a dimensão não permitir a furação com recurso a broca, muitas vezes é utilizada a micro furação para executar o furo que possibilitará a passagem do fio. Esta tecnologia é também um processo de erosão.



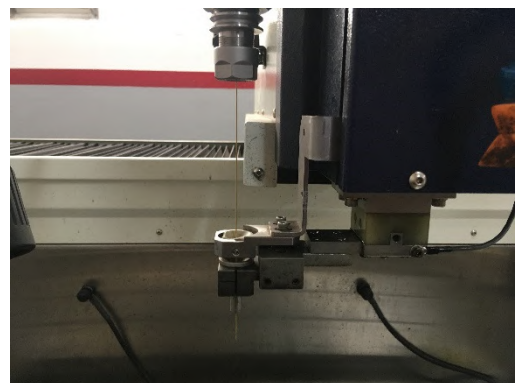
*Figura 2.7.1 Exemplo de máquina de erosão por fio*

## 2.8 Micro Furação

Esta tecnologia caracteriza-se pela execução de furos de diâmetro reduzido e que podem atingir comprimentos longos dependendo da necessidade. Para tal são utilizadas varetas de latão ou cobre consoante o material a maquinar que podem compreender diâmetros entre 0.15mm e 6mm, normalmente com 400 mm de comprimento. Estas varetas são na realidade tubos que permitem que o fluido dielétrico (normalmente água desionizada) passe no centro com pressão elevada e seja expelido na extremidade que está a erodir, limpando os detritos inerentes a um processo de erosão.

Durante a maquinagem, e ao contrário da erosão de penetração, a vareta executa a furação em modo contínuo, ou seja, não há movimentos ascendentes e descendentes, isto porque a limpeza é feita através do fluido dielétrico que passa no centro da vareta.

As máquinas mais comuns são convencionais, ou seja, todos os movimentos de localização nos eixos X, Y e W são executados manualmente pelo operador, sendo executado em modo automático o movimento do eixo Z, ou seja, a maquinagem (furação) propriamente dita. Com a necessidade de aumento de produtividade, as empresas têm cada vez mais investido em equipamentos CNC (Figura 2.8.1), onde todos os movimentos e ciclos de maquinagem são programáveis e executados em modo automático.



*Figura 2.8.1 Exemplo de máquina de micro furação*



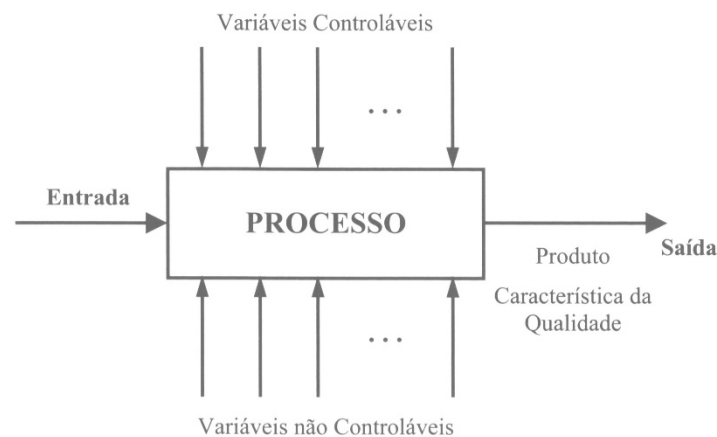


## 3 Métodos Taguchi

### 3.1 Metodologia Taguchi

Nos anos 80 o Engenheiro Japonês Genichi Taguchi propõe uma nova abordagem ao desenho de experiência que classifica com Desenho Robusto de Parâmetros (robust parameter design – RPD), também apelidada de metodologia Taguchi. Segundo Taguchi “*A Qualidade de um produto determina-se pela perda económica imposta à sociedade a partir de momento em que o produto está pronto para ser distribuído*”, para isso Taguchi considera que o produto deve ser fabricado de maneira a que seja insensível (robusto) a fatores incontroláveis (ruído).[18]

Este método consiste em classificar as variáveis de entrada de um determinado processo ou produto, em controláveis ou não controláveis (ruído), escolhendo um conjunto de variáveis controláveis que minimizem a variabilidade da resposta pretendida (Figura 3.1.1).



**Figura 3.1.1 Esquema de um processo genérico**

O método proposto por Taguchi recorre a desenho de fatoriais fracionados e matrizes compostas por vetores ortogonais para planejar as experiências de forma mais sucinta possível, minimizando em muito o número de ensaios a realizar, obtendo resultados satisfatórios na melhoria da qualidade do processo ou produto a otimizar.[12]

O planeamento de experiências passa por várias etapas:

- Identificação das características de qualidade
- Determinar o método de medição dessas mesmas características
- Selecionar as variáveis a otimizar
- Especificar os valores e níveis a utilizar
- Identificar possíveis interações
- Planear a estratégia experimental

A análise das respostas é feita através de dois tipos de estudo, respostas médias e razão sinal-ruído.

O estudo das respostas médias adequa-se mais em experiências onde não sejam considerados fatores de ruído e as variáveis de saída a analisar sejam do tipo contínuas (ANOM – Analysis of Means). Neste caso pretende-se perceber através da análise das médias das respostas ou por análise gráfica, qual o parâmetro de entrada que maior efeito provoca na resposta.[13]

No estudo da razão sinal-ruído pretende-se identificar quais os parâmetros que mais afetam a variação, para tal Taguchi propõe um método de transformação dos dados para melhor compreender a variabilidade dos mesmos.

Este método consiste na aplicação de uma de três fórmulas, Nominal-é-melhor, Menor-é-melhor e Maior-é-melhor dependendo do objetivo a atingir.

Quando o objetivo para a característica de qualidade é atingir um determinado valor, é utilizado a forma **Nominal-é-melhor (Tipo N)**.

(equação 3.1.1) 
$$(S/N)_i = 10 \log \left[ \frac{\bar{Y}_i^2}{S_i^2} - \frac{1}{n} \right]$$

Onde

–  $(S/N)_i$  Razão sinal-ruído do ensaio, em decibéis (dB)

–  $\bar{Y}_i^2$  média amostral do ensaio  $i$

–  $S_i^2$  Variância amostral do ensaio  $i$

–  $n$  Número de observação por ensaio

Quando o objetivo para a característica de qualidade é atingir o valor zero ou o menor valor possível, é utilizado a forma **Menor-é-melhor (tipo S)**.

(equação 3.1.2) 
$$(S/N)_i = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right]$$

Onde

- $(S/N)_i$  Razão sinal-ruído do ensaio, em decibéis (dB)
- $y_{ij}$  j-ésima observação do ensaio  $i$
- $n$  Número de observação por ensaio

Quando o objetivo para a característica de qualidade é atingir o maior valor possível, que tendencialmente poderá ser infinito utiliza-se a forma **Maior-é-melhor (tipo L)**.

(equação 3.1.3) 
$$(S/N)_i = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right]$$

Onde

- $(S/N)_i$  Razão sinal-ruído do ensaio, em decibéis (dB)
- $y_{ij}$  j-ésima observação do ensaio
- $n$  Número de observação por ensaio

Aplicando uma das três fórmulas, é identificado qual o melhor nível para o objetivo pretendido e deverão ser executados novos ensaios de modo a confirmar os valores obtidos.

Taguchi propõe também que sejam analisados estatisticamente os resultados através da análise de variâncias, também conhecida como ANOVA. Este cálculo estatístico consiste em decompor a variabilidade total dos dados nas suas componentes, como se mostra na equação 3.1.4.[19]

(equação 3.1.4)

$$SS_{Total} = SS_{Fator} + SS_{Erro}$$

De seguida são calculados os quadrados médios do fator e do erro, para se testar a hipótese ( $H_0$ ) de o fator não afetar a resposta. A aceitação ou rejeição da hipótese é verificada através da comparação de  $F_0$  com  $F_c$ .

Sendo que:

SS – soma dos quadrados

$MS_{Fator}$  = quadrados médios do fator

$MS_{Erro}$  = quadrados médios do erro

$$F_0 = \frac{MS_{Fator}}{MS_{Erro}}$$

$F_c$  –  $F_{\alpha, nF, nE}$  (valor critico retirado da tabela de distribuição F)

$\alpha$  – grau de significância

nF- graus de liberdade de  $MS_{Fator}$

nE – graus de liberdade de  $MS_{Erro}$

Se  $F_0 > F_c$  a hipótese  $H_0$  é rejeitada e considera-se o fator significativo.

Desta forma é possível perceber quais os fatores que minimizam a variabilidade e ajustar melhor o parâmetro em conjunto com a análise da razão sinal-ruído.

A metodologia de Taguchi permite retirar conclusões de forma rápida e simples comparativamente às técnicas de desenho de experiências clássicas e com um número de ensaios a realizar muito inferior, o que contribui para que seja cada vez mais utilizada na investigação industrial.

### 3.2 Metodologia Taguchi aplicada à Eletroerosão

Um molde para plástico é constituído por variados componentes, sendo estes organizados em grupos dependendo da função que possuem (ex: estrutura, extração, zonas moldantes- bucha, cavidade, elementos moveis, postigos, etc). Para cada um destes grupos poderá atribuir-se para a maquinagem dos mesmos um grau de relevância diferente dependendo do tempo e precisão requerida para a execução destas operações. Assim sendo considera-se as zonas moldantes como componentes críticos por serem elementos que comparativamente aos restantes demoram bastante mais tempo na maquinagem e requerem mais precisão no fabrico. Tanto é que existem empresas do sector que se especializam apenas na execução destes componentes críticos subcontratando os serviços de maquinagem dos restantes componentes.

Como tal este estudo será focado na maquinagem das zonas moldantes, especificamente no processo de erosão de penetração por ser um dos mais morosos e dispendiosos de entre os restantes.

Para tal recorrem-se aos métodos de Taguchi para otimizar os parâmetros de maquinagem e desta forma obter melhorias significativas no processo de erosão de penetração.

No passado as máquinas de erosão de penetração ainda não tinham sofrido grande desenvolvimento pelo que apenas era possível regular alguns parâmetros elétricos e de movimento. Os movimentos de posicionamento da cabeça de erosão eram executados manualmente através de manivelas e por isso são apelidadas de “erosões convencionais” (Figura 3.2.1). As trocas de ferramenta (elétrodos) eram também elas feita manualmente o que tornava o processo ainda mais lento no seu todo, não só por todo o trabalho ser manual, mas também porque o rendimento destas máquinas era reduzido comparativamente as atuais.



*Figura 3.2.1 Exemplo de máquina de erosão de penetração “convencionais”*

Com a evolução tecnológica surgem máquinas de erosão CNC (Figura 3.2.2) em que todos os movimentos são programáveis e possíveis de fazer em modo automático, com troca de eletrodos automática e com uma gama de parâmetros passíveis de regulação muito maior. No caso da máquina utilizada neste estudo existem 21 parâmetros que podem ser alterados.



*Figura 3.2.2 Erosão de penetração CNC Sodick AQ35L utilizada nos ensaios.*

Uma das formas de planejar as experiências seria, depois de escolher os parâmetros mais relevantes para o objetivo, fazer variar um de cada vez enquanto os restantes se mantinham fixos e executar esta operação para todas as combinações possíveis. Podemos imaginar que para realizar ensaios com este tipo de planeamento resultaria num número enorme de iterações o que torna essa realidade impossível de realizar em tempo útil. Tomando como exemplo estudar 5 variáveis com 3 níveis cada uma resultaria em 243 ensaios ( $3^5$ ).

Aplicando os métodos de Taguchi podemos reduzir em muito o número de ensaios e possivelmente obter resultados satisfatórios e conclusivos.

## **4 Planeamento de Ensaios**

O planeamento de experiências deste estudo passa pelas seguintes etapas:

- 4.1 Determinação das características de qualidade
- 4.2 Determinar os métodos de medição das características de qualidade
- 4.3 Escolha da matéria-prima a utilizar nos ensaios, tanto da peça a maquinar como do eléctrodo.
- 4.4 Identificação dos parâmetros de corte associados ao processo.
- 4.5 Definição e escolha dos níveis e valores adequados para os parâmetros.
- 4.6 Aplicação dos métodos de Taguchi
- 4.7 Equipamentos utilizados

### **4.1 Determinação das características de qualidade**

Na indústria dos moldes cada vez mais impera a redução de prazos e custos, para tal as empresas têm necessidade de reduzir tempos de produção e aumentar a eficiência de forma a produzir mais rápido e mais barato. Tendo em vista esta ideologia escolheram-se como características de qualidade a otimizar a Taxa de Remoção de Material (TRM), a Rugosidade final obtida ( $R_a$ ) e o Desgaste do Eléctrodo (DE).

Sendo a TRM o volume removido por unidade de tempo, maximizando este valor vamos reduzir o tempo de maquinagem e aumentar a eficiência.

Ao processo de erosão está inerente rugosidades relativamente altas comparativamente com outros processos de maquinagem, devido a este processo ser executado através de descargas eléctricas sem que haja contacto com a peça. Na maioria dos casos essa rugosidade tem de ser reduzida através de polimento, e quanto maior a rugosidade da superfície mais tempo levará para a reduzir. Importa referir que o polimento é uma operação manual que apenas faz recurso de algumas ferramentas ligeiras e de utilização manual. As superfícies resultantes do processo têm durezas elevadas o que dificulta o polimento. Por estes motivos é de todo o interesse que a rugosidade final obtida seja a menor possível de forma a reduzir os tempos de polimento ou no limite eliminá-los.

É também inerente ao processo que o eléctrodo sofra desgaste e que tenham de ser feitas repetições desses mesmo eléctrodos de modo a garantir a geometria necessária. É por isso de todo o interesse que essa repetição seja reduzida ou no limite eliminada. Para atingir esse objetivo é necessário a minimização do Desgaste do Eléctrodo.

## **4.2 Determinar os métodos de medição das características de qualidade**

Para o cálculo da TRM são registados os tempos de maquinagem bem como o peso inicial e final dos provetes. Com os pesos é calculado o volume de material removido e sabendo o tempo de execução é calculada a TRM.

Para a rugosidade será utilizado um rugosímetro, e serão feitas três medições afastadas sensivelmente de 1 mm cada, calculada a média e o desvio padrão. Regista-se os valores de Ra que é o desvio médio aritmético do perfil medido e Rz que é a altura máxima do perfil, fazendo a razão entre os dois valores determina-se a necessidade de utilizar apenas um valor ou os dois nas análises consequentes. Segundo a norma ISO3632/2-1985 [20] para comparar rugosidades em peças erodidas o desvio padrão em relação à média das medições não deve exceder 12%.

Para o cálculo do Desgaste no Eléctrodo são registados os pesos iniciais e finais do mesmo e feita a diferença entre os valores.

## **4.3 Escolha das matérias-primas**

Sendo o enfoque do estudo as zonas moldantes, estas são na maioria dos casos fabricadas em aços temperado ou pré tratados. Para a realização dos ensaios foram escolhidos um aço temperado (DIN: X40 CrMoV5-1, M.nº: 1.2344)  $\approx 50$  HRc, e um aço pré-tratado (DIN: 34 CrNiMo 6, M.nº: 1.6582)  $\approx 30$  HRc, sendo estes um bom exemplo de matérias-primas utilizadas neste grupo de peças.

No que diz respeito ao material utilizado para fabricar o eléctrodo para a erosão de aço, é possível utilizar grafite e cobre. No passado o material utilizado era cobre devido ao grafite não ser de fácil acesso no mercado e ter um preço muito elevado. Também são necessárias ferramentas revestidas a diamante para atingir rentabilidade na maquinagem do mesmo, também elas de difícil acesso e dispendiosas. As máquinas também não eram preparadas com tecnologia que permitisse a erosão de aço com grafite.

Atualmente o grafite está disponível no mercado a preços acessível, as ferramentas revestidas a diamante estão também acessíveis e a preços competitivos. A maquinagem de grafite é bastante mais rápida para o mesmo grau de acabamento superficial e comparativamente com o cobre. Poderá requerer uma maior repetição de eléctrodos pois o grafite é um material que sofre mais desgaste que o cobre durante a erosão, no entanto continua a ser um material mais rentável para o fabrico de eléctrodos. Tanto é que existem variadas empresas no ramo especializadas única e exclusivamente na maquinagem de eléctrodos em grafite.



Por os motivos enunciados anteriormente e por ser o material que melhor espelha a realidade da indústria dos moldes na atualidade, escolheu-se o grafite para a execução dos ensaios neste estudo.

#### 4.4 Identificação dos parâmetros de corte

Apresentam-se os 21 parâmetros passíveis de otimização separados em condições elétricas e condições de movimento na Tabelas 4.4.1 e Tabela 4.4.2:

*Tabela 4.4.1 - condições elétricas de maquinagem*

Condições elétricas	
Parâmetro	Descrição
PL	Polaridade
ON	Tempo de descarga elétrica pulsada
OFF	Tempo de repouso da descarga elétrica pulsada
IP	Corrente de pico
SV	Tensão do servo
S	Velocidade do servo
V	Tensão da fonte
HP	Controlo do circuito da fonte auxiliar
PP	Pulso Pikaden
C	Condensador
ALV	Nível de deteção de arco
OC	Controlo de pulso ON
LF	Controlo do pulso OFF

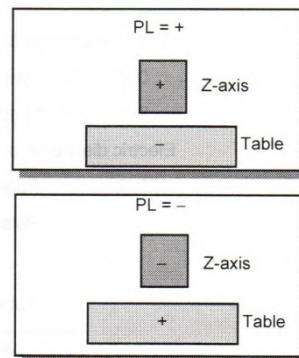
*Tabela 4.4.2 - condições de movimentos de maquinagem*

Condições de movimento	
Parâmetro	Descrição
UP	Tempo de subida/descida
DN	Tempo de descarga
JS	Velocidade do salto
LNS	Forma da órbita
STEP	Raio de órbita
JM	Modo de salto
LS	Velocidade e direção de órbita
LNM	Modo de órbita

Fazendo uma descrição mais detalhada dos parâmetros temos:

PL:

Este parâmetro determina a polaridade elétrica entre o eletrodo (ferramenta) e a peça a maquinar que pode ser positiva “+” ou negativa “-“. A Figura 4.4.1 explicita como o parâmetro faz variar a polaridade na “cabeça” da máquina (eletrodo) e correspondentemente na “mesa” (peça a maquinar).



*Figura 4.4.1 - esquema polaridade elétrica*

ON:

O processo de erosão remove material através da descarga elétrica pulsada que passa entre o eletrodo e a peça a maquinar. Para tal o parâmetro ON determina a duração do pulso elétrico que pode variar entre 0.5 e 4000  $\mu$ s.

Este parâmetro não é de entrada direta para a programação da máquina existindo uma correspondência entre parâmetro máquina e valor nominal do parâmetro ( $\mu$ s) (Tabela 4.4.3).

**Tabela 4.4.3 – Correspondência de parâmetro máquina com o valor nominal de ON.**

ON ****	$\tau$ ON ( $\mu$ sec)
*000	0.5
*001 ... *100	1 ... 100
*101 ... *104	100
*105 ... *109	105
:	:
:	:
*985 ... *989	985
*990	990
*991	1000
*992	1250
*993	1500
*994	1750
*995	2000
*996	2250
*997	2500
*998	3000
*999	4000

Pode-se verificar que o parâmetro máquina pode variar entre 0 e 999.

#### OFF:

Determina a duração de paragem/repouso entre os pulsos da descarga elétrica.

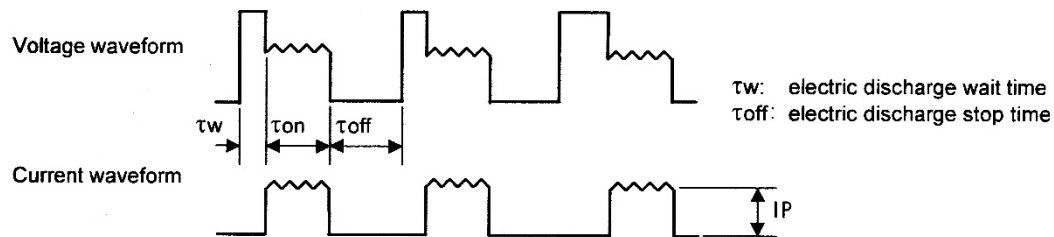
É um parâmetro que tem entrada direta no parâmetro máquina variando entre 0 e 2500  $\mu$ s (Tabela 4.4.4).

**Tabela 4.4.4 – Correspondência direta do parâmetro OFF**

OFF *****	$\tau$ OFF ( $\mu$ sec)
0000	1
0001 ... 0250	1 ... 250
0251	250
0252, 0253	252
0254, 0255	254
:	:
:	:
0498, 0499	498
0500	500
0501 ... 0504	500
0505 ... 0509	505
:	:
:	:
0995 ... 0999	995
1000	1000
1001 ... 1009	1000
1010 ... 1019	1010
:	:
:	:
2490 ... 2499	2490
2500	2500

Na Figura 4.4.2 podemos perceber melhor qual a forma da onda de descarga elétrica. Note-se que existe um tempo de espera  $\tau_w$  seguido do tempo de descarga  $\tau_{on}$  correspondente ao parâmetro ON seguido de um tempo de paragem  $\tau_{off}$  correspondente ao parâmetro OFF.

**ON (pulse duration =  $\tau_{on}$ ) and IP (peak current)**



**Figura 4.4.2 – Forma da onda de descarga elétrica**

Segundo o fabricante os parâmetros que alteram as características fundamentais de corte são ON e IP, enquanto que a velocidade de maquinagem é determinada pelo número de descargas elétricas num determinado tempo. Para controlar esse mesmo número de descarga é utilizado o parâmetro OFF. No entanto este parâmetro não deve ser demasiado pequeno sob pena de a maquinagem se tornar instável. Por isso o fabricante recomenda a seleção do parâmetro tendo em conta um fator de serviço de 50% a 80% e sugere as equações 4.4.1 e 4.4.2 para o cálculo de OFF.

Foi então escolhido um fator de serviço (FS) de 65% por ser o valor intermédio.

$$(equação 4.4.1) \quad FS = \frac{\tau_{on}}{\tau_{on} + \tau_{off} + \tau_w}$$

$$(equação 4.4.2) \quad \tau_w \approx 0,1 \times \tau_{on}$$

Resolvendo a equação 4.4.1 em ordem a  $\tau_{off}$  e substituindo FS por 0.65 chegamos à seguinte equação.

$$(equação 4.4.3) \quad \tau_{off} = 0,438 \times \tau_{on}$$

Desta forma foi calculado o parâmetro OFF para um fator de serviço de 65%.

### IP:

Especifica a corrente aplicada à descarga elétrica. Esta corrente é determinada combinando os parâmetros de corrente IP e tensão V, e não é de entrada direta em parâmetro máquina (Tabela 4.4.5). É um parâmetro importante no que toca à velocidade de maquinagem, acabamento de superfície e desgaste do eletrodo em combinação com o parâmetro ON.

**Tabela 4.4.5 – Correspondência do parâmetro máquina com o valor nominal combinado com V**

IP *** *	Electric Discharge Peak Current (A)		
	Main Supply Voltage V1 = 90 V	Main Supply Voltage V2 = 120 V	
000.0	0	0	Micro peak current
000.4	1.5	2.0	
001.0	3.0	4.0	
002.0	6.0	8.0	Main peak current
003.0	9.0	12.0	
:	:	:	
:	:	:	
031.0	93.0	124.0	

### V:

Determina a tensão fornecida durante a maquinagem. É um parâmetro discreto pelo que apenas pode assumir os valores de 90 ou 120 Volts. Não tem entrada direta no parâmetro máquina e é recomendado pelo fabricante a utilização de 120V na maquinagem de aço com eletrodo em grafite (Tabela 4.4.6). Faz também correspondência com o parâmetro IP na determinação do valor da corrente de maquinagem (Tabela 4.4.7).

**Tabela 4.4.6 Correspondência do parâmetro máquina com o valor nominal de V**

V **	Main Supply Voltage (V)	Major Applications
*1	90	Cu-St machining
*2	120	Gr-St, CuW-WC machining

**Tabela 4.4.7 Correspondência de V com o parâmetro IP na determinação do valor da corrente**

V = No-load Voltage	IP = Peak Current Value							
	0	0.4	1	3	5	10	15	31
1 = 90 V	0	1.5 A	3 A	9 A	15 A	30 A	45 A	93 A
2 = 120 V	0	2.0 A	4 A	12 A	20 A	40 A	60 A	124 A

### SV:

Este parâmetro (servo voltage) especifica a tensão de referência aplicada no servo motor, o que faz avançar ou retrainr o eléctrodo durante a maquinação (Tabela 4.4.8), e por isso tem grande influência na velocidade de maquinação e na eficiência de limpeza dos resíduos. Tem entrada direta em parâmetro máquina e pode variar entre 0 e 255 V. O fabricante refere que SV não deve ser maior que V sob pena a maquinação ser extremamente lenta.

Foi verificado durante os ensaios que para valores de SV maiores que 120 V a maquinação é muito instável ocorrendo arcos eléctricos constantes. Verificou-se também que para valores de 200 V ou superior a maquinação é impossível pois o eléctrodo avança com velocidade excessiva de tal forma que entra em contacto com a peça e faz parar a maquinação.

Visto o parâmetro V ser constante e ter o valor de 120 V foram tomados em consideração para “SV” os valores [10;100].

É um parâmetro de carácter eléctrico, no entanto o seu efeito tem repercussões no movimento do eléctrodo.

***Tabela 4.4.8 Correspondência parâmetro máquina / valor nominal de SV e efeito consequente.***

SV ***	Servo voltage (V)		
000	0		
001	1		
002	2		
:	:		
:	:		
253	253		
254	254		
255	255		

### S:

Determina a velocidade do servo motor em condição de não carga, isto é, sem eléctrodo e sem estar em descarga. É considerado pelo fabricante um parâmetro eléctrico, no entanto os seus efeitos são exclusivamente no movimento.

HP:

Existe a possibilidade de a máquina ser equipada com um circuito de controle de alta tensão separado do circuito de fornecimento principal, sendo este caso uma opção requerida pelo comprador.

É usado para aumentar a eficiência da descarga elétrica, no entanto não existe no equipamento utilizado para os ensaios, e por esse motivo será considerado 0.

PP:

Este parâmetro (pulso de Pikaden) é mais uma vez um circuito auxiliar e opcional, apenas válido para maquinagens com eletrodo em cobre, que diminui o desgaste e aumenta a eficiência quando combinado com "HP". Mais uma vez o equipamento não possui este circuito auxiliar e por isso iremos considerar este parâmetro 0 para todos os ensaios.

C:

Este parâmetro determina a capacidade induzida no condensador de descarga. É uma variável que não tem entrada direta no parâmetro máquina podendo variar entre 0 e 0,1  $\mu\text{F}$  (Tabela 4.4.9.).

Mais uma vez é possível chegar aos 1,4  $\mu\text{F}$  utilizando um circuito opcional que não está instalado na máquina utilizada para os ensaios.

***Tabela 4.4.9 Correspondência do parâmetro máquina com o valor nominal de "C"***

C *	Capacitor Capacity ( $\mu\text{F}$ )	Standard/Optional
0	None	Standard
1	0.007	
2	0.01	
3	0.022	
4	0.047	
5	0.1	
6	0.2	Optional (*)
7	0.4	
8	0.8	
9	1.4	

#### ALV:

Determina o nível de detecção de arco elétrico e pode variar entre 0 e 63, sendo um parâmetro adimensional de entrada direta em parâmetros máquina. O fabricante informa que níveis altos deste parâmetro podem inviabilizar o início da maquinagem. Tendo em conta este fator e a possibilidade de este parâmetro poder introduzir algum “ruído” na análise dos resultados e inviabilizar o ensaio, considerou-se o valor 0 para todos os ensaios.

#### OC:

Este parâmetro determina a duração de referência do pulso “ON”. Segundo o fabricante normalmente deve ser 0 e só deve ser alterado caso a maquinagem seja instável. Para efeito deste estudo não será interessante utilizar um parâmetro que previna a instabilidade da maquinagem pois caso esta exista queremos detetá-la para que possamos tirar conclusões. Por estes motivos considerou-se 0 para todos os ensaios.

#### LF:

Parâmetro que controla a velocidade de pulso entre “ON” e “OFF”. Mais uma vez deve ser normalmente 0 e é utilizado para estabilizar maquinagens instáveis estendendo a duração de “OFF”. Foi considerado 0 para todos os ensaios.

Passando agora para a descrição dos parâmetros de movimento.

#### UP

Define a duração do movimento ascendente e consequente descendente durante a maquinagem. Este movimento promove a limpeza dos detritos que se acumulam no espaço entre o eléctrodo e a peça (GAP), espaço onde ocorre a descarga eléctrica. Pode variar entre 0 e 9,99 s sendo que se for 0 não existe movimento ascendente.



A correspondência de parâmetro máquina apresenta-se na Tabela 4.4.10.

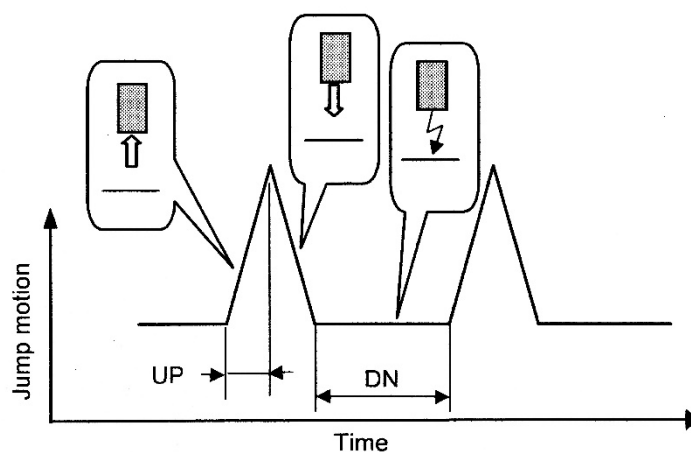
**Tabela 4.4.10. Correspondência do parâmetro máquina com o valor nominal de “UP”**

UP ***	Duration (sec)
000	No jump
001	0.01
⋮	⋮
⋮	⋮
999	9.99

### DN

Especifica o tempo em que ocorre a descarga elétrica antes do próximo salto “UP”, isto é, é o tempo em que o eletrodo está em baixo (DOWN) e ocorre a maquinagem propriamente dita. Mais uma vez pode variar de 0 a 9,99 s e tem a mesma correspondência de entrada em parâmetro máquina do “UP”. Se for definido como 0 a maquinagem não ocorre.

Na Figura 4.4.3 podemos perceber melhor como ocorre o movimento durante a maquinagem e como os parâmetros “UP” e “DN” o alteram.



**Figura 4.4.3 Representação do movimento de salto e correspondência com UP/DN.**

## JS

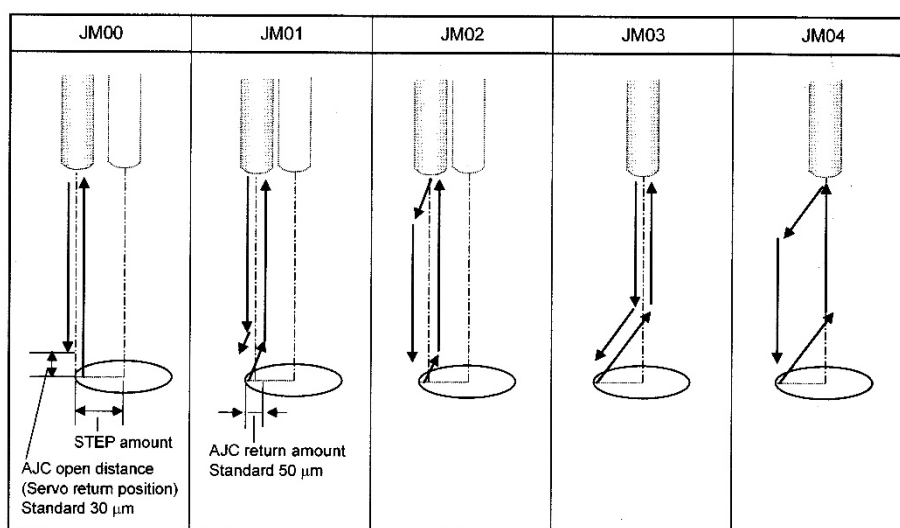
Este parâmetro altera a velocidade do salto (Jump Speed), no movimento ascendente e descendente (“UP”). Pode variar de 0 a 36 m/min, sendo que se for 0 não ocorre o salto e é de entrada direta nos parâmetros máquina.

Em todos os ensaios este parâmetro foi fixado em 18 m/min que é um valor intermédio.

## JM

Define o padrão de movimento do salto. Pode tomar os valores inteiros entre 0 e 4 e podemos verificar na Figura 4.4.4 os diferentes padrões de movimento.

Nos ensaios foi utilizado o valor 0 porque este parâmetro tem maior influência em fatores dimensionais e geométricos, o que não é do interesse deste estudo.















*Figura 4.4.4 Padrões de movimento alterados pelo parâmetro “JM”*

## LNS

Define a forma do orbita (plana ou solida) executada durante a maquinagem. Pode-se verificar na Tabela 4.4.11 os valores que pode assumir e que efeitos causa no movimento. Mais uma vez é um parâmetro que surte o seu maior efeito a nível de geometria dimensional, o que não é do interesse do estudo e por isso foi assumido para todos os ensaios o valor 0.

**Tabela 4.4.11 Valores que “LNM” pode assumir e suas consequências geométricas.**

LNS ****	Plane Shape	LNS ****	Solid Shape
0000	None	**0*	Straight
***1		**1*	Cone Example: 
***2		**2*	Taper Example: 
***3		**3*	Revised taper Example: 
***4		**4*	Wedge 
***5		**5*	Vault 
***6	Polygon	**6*	Sphere 
***7	Radiation	**7*	Oblique Example: 
***8	Quadrant		
***9	Random		

## STEP

Define o raio da orbita executada durante a maquinagem e pode assumir valores entre 0 e 9,99 mm sendo de entrada direta em parâmetro máquina. É um parâmetro que define o rigor dimensional da geometria maquinada na peça, pelo que mais uma vez não é do interesse deste estudo e foi considerado 0 para todos os ensaios.

## LS

Define a velocidade e direção da orbita executada na maquinagem. A velocidade pode variar entre 0 e 9 e a direção varia no sentido dos ponteiros do relógio, no sentido contrário aos ponteiros do relógio ou inverte o sentido a cada 2 rotações (Tabela 4.4.12).

É um parâmetro que interfere apenas na geometria e dimensão final da maquinagem e apenas faz sentido existir em conjunto com o raio de orbita (“STEP”), por isso foi considerado 0 em todos os ensaios.





**Tabela 4.4.12. Correspondência do parâmetro máquina “LS” com o movimento que provoca.**




LS **	Loran Direction
0*	Reversed every two rotations
1*	CCW
2*	CW

## LNM

Define mais uma vez o tipo de órbita executada, fazendo variar o plano de órbita, a retração da órbita e tipo de órbita (Tabela 4.4.13). Nos ensaios não são executadas órbitas e por isso qualquer um destes parâmetros não tem interesse para o estudo e foram considerados 0.

**Tabela 4.4.13 Correspondência do parâmetro máquina “LNM” com o movimento que provoca.**

LNM ***	Plane Selection	
**0	XY	
**1	ZX	
**2	YZ	
**3	Right-angled to the axis	

LNM ***	Servo Selection	
*0*	w/o servo	
*1*	Path servo	
*2*	Center servo	

⚡ : Short-circuit at the gap    ↻ : Loran direction    ➡ : Servo-back direction

## 4.5 Escolha e definição dos níveis e valores adequados

Mesmo utilizando os métodos de Taguchi que reduzem um muito o número necessário de ensaios, com uma variedade tão grande de parâmetros atingiríamos um número bastante elevado de ensaios, ainda mais porque muitos dos parâmetros apenas têm influência no resultado geométrico e dimensional da peça a maquinar, o que não é o objeto de estudo. Por estes motivos foram escolhidos apenas alguns parâmetros aparentemente relevantes para as variáveis de entrada, bem como os três níveis ou valores que refletem um bom exemplo do espectro. Escolheu-se dois valores próximos dos limites do espectro, mas que não sejam valores extremos, bem como um valor intermedio entre os dois (Tabela 4.5.1).

*Tabela 4.5.1 Parâmetros possíveis e seleção de níveis*

Parâmetro	Valores/níveis possíveis (nominais)	Valores/níveis escolhidos (nominais)	Valores/níveis correspondentes (parâmetro máquina)
PL	+/-	+ -	+ -
ON	[0,5;4000] $\mu$ s	500 1750 3000	500 994 998
OFF	[0;2500] $\mu$ s	219 767 1315	220 767 1310
IP	[0;124] A	12 56 100	3 14 25
SV	[0;255] V	10 55 100	10 55 100
S	[0;99]	55	55
V	90/120 V	120	0
HP	[0;3,5] A	0	0
PP	n.a.	0	0
C	[0;0,1] $\mu$ F	0,01 0,0285 0,047	2 3 4
ALV	n.a.	0	0
OC	n.a.	0	0
LF	n.a.	0	0
UP	[0,01;9,99] s	0,2 4,1 8	20 410 800
DN	[0,01;9,99] s	0,2 4,1 8	20 410 800
JS	[1;36] s	18	18
LNS	n.a.	0	0
STEP	[0;9,99] mm	0	0
JM	[0;4]	0	0
LS	n.a.	0	0
LNM	n.a.	0	0

Resumindo a Tabela 4.5.1 ficamos com 7 variáveis para otimizar tendo em conta que “OFF” é dependente de “ON” e que todas as outras são constantes em todos os ensaios (Tabela 4.5.3). Das variáveis a otimizar 1 é discreta e 6 contínuas (Tabela 4.5.2).

***Tabela 4.5.2 Parâmetros a otimizar***

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores/níveis possíveis (nominais)</b>	<b>Valores/níveis escolhidos (nominais)</b>	<b>Valores/níveis escolhidos (parâmetro máquina)</b>
PL	+/-	+ -	+ -
ON	[0,5;4000] $\mu$ s	500 1750 3000	500 994 998
OFF	[0;2500] $\mu$ s	219 767 1315	220 767 1310
IP	[0;124] A	12 56 100	3 14 25
SV	[0;255] V	10 55 100	10 55 100
C	[0;0,1] $\mu$ F	0,01 0,0285 0,047	2 3 4
UP	[0,01;9,99] s	0,2 4,1 8	20 410 800
DN	[0,01;9,99] s	0,2 4,1 8	20 410 800

***Tabela 4.5.3 Parâmetros contantes em todos os ensaios***

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores/níveis possíveis (nominais)</b>	<b>Valores/níveis escolhidos (nominais)</b>	<b>Valores/níveis escolhidos (parâmetro máquina)</b>
S	[0;99]	55	55
V	90/120 V	120	0
HP	[0;3,5] A	0	0
PP	n.a.	0	0
ALV	n.a.	0	0
OC	n.a.	0	0
LF	n.a.	0	0
JS	[1;36] s	18	18
LNS	n.a.	0	0
STEP	[0;9,99] mm	0	0
JM	[0;4]	0	0
LS	n.a.	0	0
LNM	n.a.	0	0

## 4.6 Aplicação dos métodos de Taguchi

Sabendo as variáveis a estudar e suas características, escolheu-se uma matriz de Taguchi L18 com 1 variável com 2 níveis (discreta, “PL”) e 6 variáveis com 3 níveis (parâmetros contínuos). Não são consideradas variáveis incontroláveis (ruído) pois as existentes não são significativas nem causam real impacto para o estudo. Recorrendo ao software Minitab®17 chega-se à Tabela 4.6.1 que descreve os ensaios realizados e parâmetros utilizados em cada um (Tabela 4.6.2). De notar que OFF é dependente de ON e foi calculado como descrito no capítulo 4.4.

*Tabela 4.6.1 Matriz Taguchi L18 com níveis a utilizar*

Nº ensaio	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3
5	1	2	2	2	3	3	1
6	1	2	3	3	1	1	2
7	1	3	1	2	1	3	2
8	1	3	2	3	2	1	3
9	1	3	3	1	3	2	1
10	2	1	1	3	3	2	2
11	2	1	2	1	1	3	3
12	2	1	3	2	2	1	1
13	2	2	1	2	3	1	3
14	2	2	2	3	1	2	1
15	2	2	3	1	2	3	2
16	2	3	1	3	2	3	1
17	2	3	2	1	3	1	2
18	2	3	3	2	1	2	3

**Tabela 4.6.2 Matriz Taguchi L18 com parâmetros utilizados**

<b>Nº ensaio</b>	<b>PL</b>	<b>ON</b>	<b>OFF</b>	<b>IP</b>	<b>SV</b>	<b>UP</b>	<b>DN</b>	<b>C</b>
<b>1</b>	-	500	220	3	10	20	20	2
<b>2</b>	-	500	220	14	55	410	410	3
<b>3</b>	-	500	220	25	100	800	800	4
<b>4</b>	-	994	765	3	10	410	410	4
<b>5</b>	-	994	765	14	55	800	800	2
<b>6</b>	-	994	765	25	100	20	20	3
<b>7</b>	-	998	1310	3	55	20	800	3
<b>8</b>	-	998	1310	14	100	410	20	4
<b>9</b>	-	998	1310	25	10	800	410	3
<b>10</b>	+	500	220	3	100	800	410	3
<b>11</b>	+	500	220	14	10	20	800	4
<b>12</b>	+	500	220	25	55	410	20	2
<b>13</b>	+	994	765	3	55	800	20	4
<b>14</b>	+	994	765	14	100	20	410	2
<b>15</b>	+	994	765	25	10	410	800	3
<b>16</b>	+	998	1310	3	100	410	800	2
<b>17</b>	+	998	1310	14	10	800	20	3
<b>18</b>	+	998	1310	25	55	20	410	4



## 4.7 Equipamentos utilizados

Este estudo foi realizado nas instalações da Moldes Catarino e foi utilizado equipamento pertencente à empresa que passamos a descrever.

### 1. Erosão de fio

Foi utilizada uma máquina de erosão por fio da marca Sodick modelo A535 (Figura 4.7.1), para fazer o corte dos provetes.



*Figura 4.7.1 Sodick A535*

### 2. Punções

Na marcação dos provetes utilizou-se punções de números (Figura 4.7.2) e letras. Cada provete foi identificado com uma letra e quatro números correspondentes a quatro posições possíveis de executar ensaios.



*Figura 4.7.2 Punções de marcação de números*

### 3. Retificadora

Depois da marcação e do tratamento térmico (no caso do aço 1.2344) todos os provetes foram retificados numa retificadora plana semi-automática da marca ELB modelo SN6 VAI (Figura 4.7.3)



*Figura 4.7.3 Retificadora plana ELB*

### 4. Erosão penetração

Utilizou-se para a execução dos ensaios uma máquina de erosão de penetração da marca Sodick modelo AQ35L (Figura 4.7.4), equipado com motores lineares e utiliza um fluido dielétrico EDMfluid MP 108SE para submergir as peças a maquinar.



*Figura 4.7.4 Sodick AQ35 L*

## 5. Balança

Foi utilizada uma balança de pequenas dimensões (Figura 4.7.5) com resolução de 0,1g em todas as medições de peso.



*Figura 4.7.5 Balança utilizada nas medições de peso*

## 6. Rugosímetro

Utilizou-se um rugosímetro da marca Tesa modelo Rugosurf 20 (Figura 4.7.6) com uma resolução de 0,001  $\mu\text{m}$  e uma precisão de classe 1 segundo a norma ISO 3274.



*Figura 4.7.6 Rugosímetro Tesa Rugosurf 20*

## 7. Microscópio digital

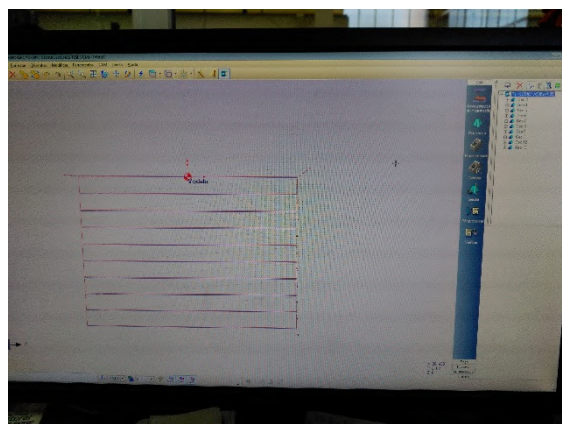
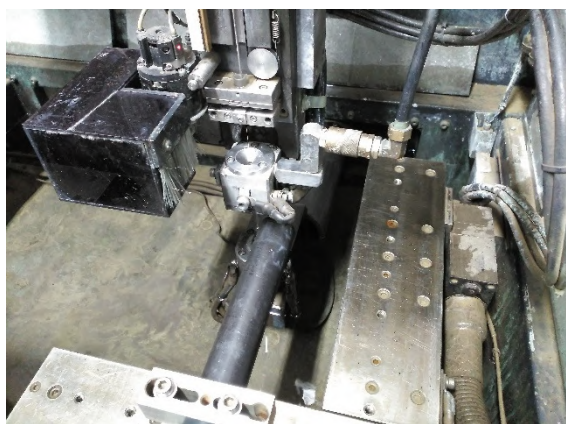
De forma a fotografar as provetes e eléctrodos utilizados nos ensaios foi utilizado o microscópio digital da marca Accud modelo DM200 (Figura 4.7.7).



*Figura 4.7.7 Microscópio digital Accud DM200*

## 5 Ensaaios

Para a realização dos ensaios recorre-se a provetes dos aços selecionados. Para o fabrico dos provetes foi utilizado aço existente na empresa em forma de varão redondo, que foi cortado através de erosão por fio recorrendo a software CAM FIKUS® (Figura 5.1, Anexo I), marcado com punção e retificado (Figura 5.3) para que as condições iniciais em cada ensaio (espessura do provete e rugosidade media) fossem as mesmas em todos os provetes (Figura 5.2). No caso do aço temperado, após a marcação, este sofreu um processo de têmpera aumentando a sua dureza de cerca de 20 HRC para 48-50 HRC com o objetivo de simular as características do material utilizado no fabrico dos componentes do molde, só posteriormente foi retificado.

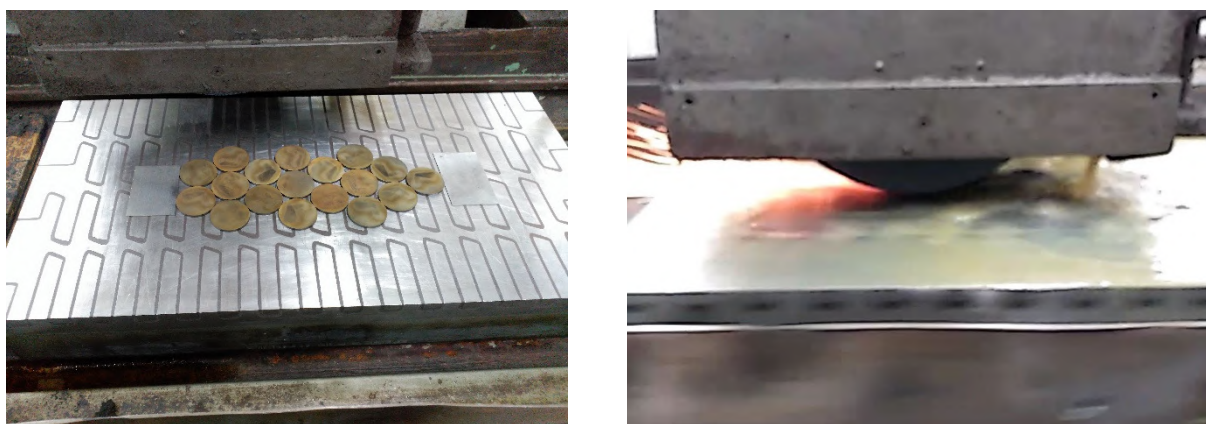


***Figura 5.1 Corte dos provetes por erosão de fio e programação CAM***



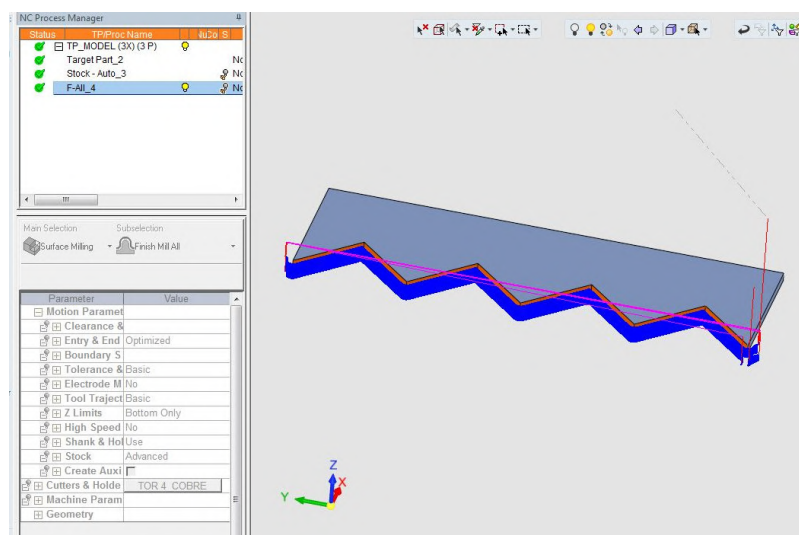
***Figura 5.2 Exemplo de provete depois de puncionado e retificado.***





**Figura 5.3 Retificação dos provetes**

Depois de produzidos os provetes executou-se um gabarito de posicionamento para que se troquem os provetes com facilidade entre ensaios. Este gabarito foi fresado a partir de uma barra de aço com recurso a software CAM, Cimatron®14 (Figura 5.4). Em cada provete é possível executar 4 ensaios e são colocados 4 de cada vez no gabarito (Figura 5.5).

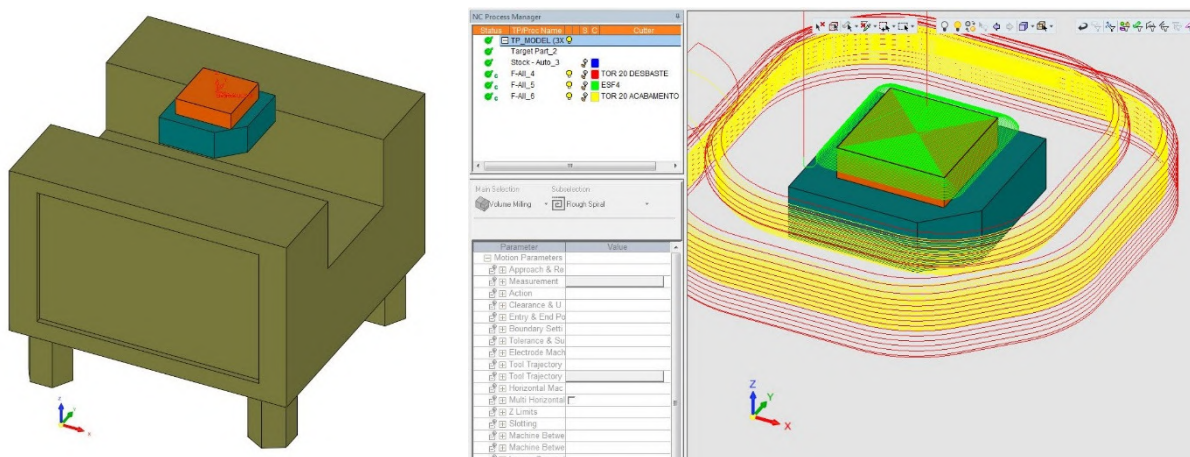


**Figura 5.4 Programação CAM da fresagem do gabarito de centragem dos provetes**



**Figura 5.5 Gabarito de centragem**

Foram também maquinados 40 elétrodos para garantir um elétrodo por ensaio (18 ensaios para cada aço) e alguns suplentes. Foi desenhado o modelo 3D recorrendo ao software CAD Cimatron®14 (Figura 5.6), de seguida fez-se a programação CAM e maquinaram-se os elétrodos em grafite.



**Figura 5.6 Modelação e programação dos elétrodos em grafite**

Tendo em conta 18 ensaios organizou-se os ensaios em 5 séries e elaborou-se 5 programas em que são introduzidos os parâmetros escolhidos em cada um deles (Anexo V). Este programas são executados através de um programa de chamada que consiste em fazer o deslocamento para as cotas pretendidas, encontrar a cota no eixo Z em que o eléctrodo toca no provete e fazer esse ponto corresponder a  $Z=0$ , chamar o programa com os parâmetros de maquinagem desejados e no final da maquinagem fazer uma paragem para que seja registado o tempo de execução (Anexo IV). Tempo este que nos é dado pela própria máquina.

Inicialmente foi considerada uma profundidade de erosão de 0,3mm. Verificou-se após alguns ensaios que para esta profundidade o eléctrodo praticamente não sofria qualquer alteração de peso, ou pelo menos não sofria alteração significativa para que o equipamento utilizado na medição a detetasse. Por esse motivo a profundidade de erosão considerada foi de 0,5mm na tentativa de mitigar o problema.

Para cada ensaio foi registado o peso inicial e final do eléctrodo e do provete através de 3 medições que se revelaram ser todas de igual valor (Anexo VII e Anexo VIII). No caso dos eléctrodos verificou-se que nos primeiros ensaios aumentavam de peso quando seria expectável que diminuíssem. Este facto deve-se à absorção de fluido dielétrico durante a maquinagem por parte do grafite, visto este ser um material bastante poroso. Para colmatar esta questão todos os eléctrodos e provetes foram mergulhados em fluido dielétrico previamente à execução dos ensaios. Desta forma não se verificou aumento de peso, verificou-se como era expectável diminuição ou conservação de peso.

Alguns ensaios não terminaram devido a tempos excessivos de maquinagem ou devido à cota no eixo Z estar a aumentar (subir) em vez de diminuir (descer). Este facto deve-se à grande instabilidade observada em alguns ensaios.

Nos casos em que a cota Z subia a maquinagem é feita por “flashes” ou arcos eléctricos (Figura 5.7 à direita) e de forma inconstante. Por vezes, se for dado tempo suficiente, forma-se uma pequena acumulação de resíduos ou erupção (semelhante a grafite) com aparência esférica por onde toda a descarga eléctrica é conduzida, podendo até ficar incandescente (Figura 5.7 à esquerda).





*Figura 5.7 Exemplo de maquinagem instável*

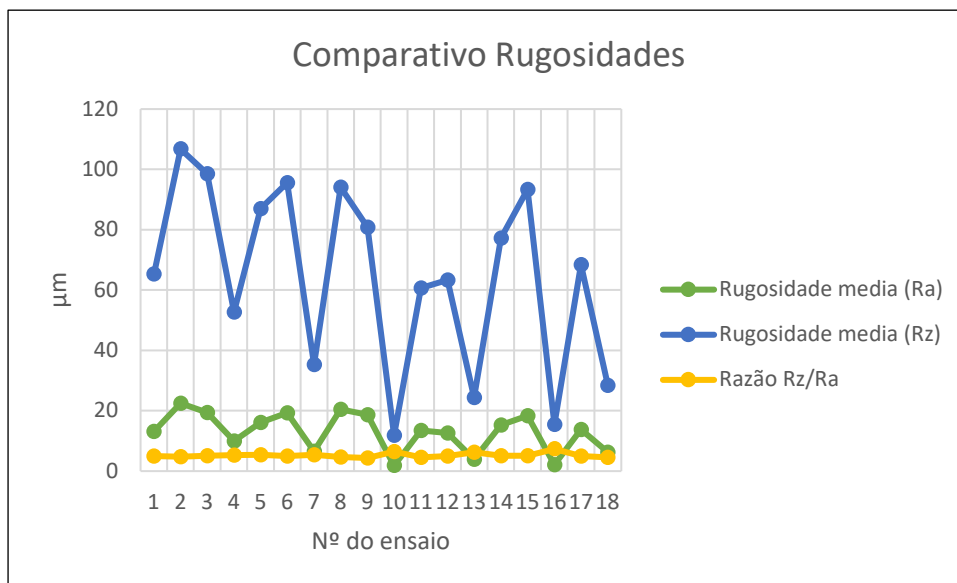
Depois de realizados os ensaios chegamos aos resultados expostos na Tabela 5.1 para o aço pré tratado e Tabela 5.2 para o aço temperado. De notar que os ensaios que não terminaram estão a vermelho.

*Tabela 5.1 Resultados dos ensaios realizados no aço 1.6582 (pré tratado)*

Ensaio	Provete	TRM (cm <sup>3</sup> /s)	DE (g)	$\overline{Ra}$ ( $\mu$ m)	$\sigma/\overline{Ra}$ (%)	$\overline{Rz}$ ( $\mu$ m)	$\sigma/\overline{Rz}$ (%)	Razão Rz/Ra	Tempo (hh:mm:ss)
1	A1	4,77E-04	0,00	13,13	4,62	65,32	2,94	4,97	0:01:47
2	C1	7,68E-04	0,10	22,49	1,63	106,79	1,92	4,75	0:01:23
3	E1	6,99E-04	0,00	19,41	3,77	98,53	2,13	5,08	0:01:13
4	G1	2,50E-05	0,00	9,92	2,14	52,75	4,78	5,32	0:08:30
5	I1	1,10E-03	0,10	16,13	2,67	86,99	6,19	5,39	0:00:58
6	K1	1,57E-04	0,10	19,25	8,20	95,63	4,51	4,97	0:06:47
7	M1	2,82E-05	0,00	6,51	6,97	35,26	3,96	5,41	0:22:35
8	O1	6,66E-05	0,10	20,44	0,54	94,12	2,74	4,61	0:15:57
9	A3	5,19E-04	0,10	18,66	2,75	80,86	0,77	4,33	0:02:03
10	C3	1,45E-05	0,10	1,85	1,37	11,87	2,49	6,42	0:43:50
11	E3	3,67E-04	0,10	13,42	1,35	60,65	4,74	4,52	0:02:19
12	G3	6,63E-04	0,10	12,62	1,57	63,37	0,91	5,02	0:01:17
13	A2	0,00E+00	0,00	3,91	4,90	24,35	1,50	6,23	0:27:00
14	C2	1,74E-04	0,00	15,30	3,07	77,25	5,84	5,05	0:06:06
15	E2	1,66E-04	0,10	18,30	0,87	93,38	1,83	5,10	0:03:51
16	G2	0,00E+00	0,00	2,10	33,07	15,51	20,75	7,38	0:10:08
17	A4	5,00E-05	0,00	13,72	3,60	68,46	2,29	4,99	0:12:46
18	C4	7,00E-04	0,10	6,27	6,99	28,44	15,92	4,54	0:02:44

**Tabela 5.2 Resultados dos ensaios realizados no aço 1.2344 (temperado)**

Ensaio	Provete	TRM (cm <sup>3</sup> /s)	DE (g)	$\overline{Ra}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma/\overline{Ra}$ (%)	$\overline{Rz}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma/\overline{Rz}$ (%)	Razão Rz/Ra	Tempo (hh:mm:ss)
1	A1	1,10E-03	0,20	11,31	9,25	56,52	6,90	5,00	0:01:31
2	C1	2,49E-03	0,10	20,40	1,62	106,41	2,41	5,22	0:03:21
3	A2	5,84E-03	0,00	19,93	8,97	96,65	9,21	4,85	0:02:17
4	C2	4,26E-04	0,10	5,27	1,63	30,87	2,30	5,86	0:03:55
5	I1	9,09E-03	0,10	17,61	10,37	77,12	12,78	4,38	0:00:55
6	K1	1,43E-03	0,10	23,40	2,02	103,92	2,14	4,44	0:07:01
7	E1	1,58E-04	0,10	5,78	2,92	33,94	1,29	5,87	0:42:11
8	G1	8,12E-04	0,30	16,68	3,99	76,37	3,60	4,58	0:10:16
9	G2	2,87E-05	0,00	2,37	1,00	12,10	2,78	5,10	0:58:00
10	E2	1,92E-03	0,00	15,31	2,62	61,79	3,95	4,04	0:05:12
11	I2	2,79E-03	0,00	10,20	6,25	52,61	9,24	5,16	0:03:35
12	K2	0,00E+00	0,00	3,51	1,61	17,56	3,29	5,00	0:13:22
13	G3	2,04E-03	0,00	12,48	0,94	63,25	0,25	5,07	0:02:27
14	E3	6,12E-05	0,00	2,75	3,83	15,59	6,09	5,66	1:48:54
15	I3	2,02E-03	0,00	10,83	0,27	42,81	3,33	3,95	0:03:18
16	K3	5,88E-03	0,00	14,30	2,71	65,33	1,57	4,57	0:01:25
17	A3	4,67E-04	0,00	6,92	12,22	28,63	4,82	4,14	0:03:34
18	C3	2,30E-03	0,10	15,25	4,01	73,81	2,33	4,84	0:01:27



**Figura 5.8** Gráfico das rugosidades Ra, Rz e razão Ra/Rz

Fazendo uma análise aos parâmetros de rugosidade podemos perceber que embora a variação de ensaio para ensaio seja grande tanto em Ra como em Rz, a razão entre eles mantem-se constante (Figura 5.8).

Também sabemos que segundo a norma ISO3632/2-1985 [20] para comparar rugosidades em peças erodidas o desvio padrão em relação à média das medições não deve exceder 12%, o que se verifica na esmagadora maioria dos casos tanto para Ra como para Rz.

Por os motivos enunciados conclui-se que Ra é um bom parâmetro de avaliação da rugosidade no caso em questão e daqui em diante apenas se tratará dos dados com o valor de Ra.

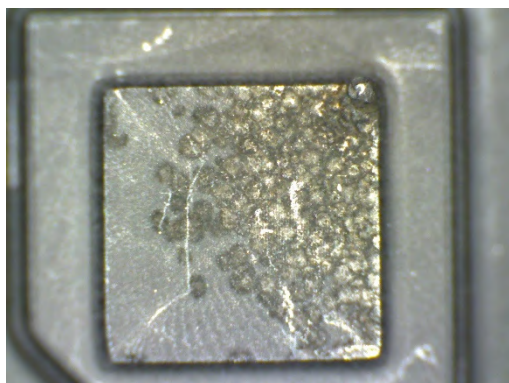
Foi também medida a rugosidade média da superfície retificada onde se obteve um valor de  $Ra=1.293\mu\text{m}$ . Este valor serve apenas para comparação com as rugosidades obtidas nos ensaios.



## 6 Análise de resultados

Facilmente se percebe que muitos ensaios foram falhados e mesmo alguns com sucesso demoraram muito tempo e resultaram em valores de TRM e DE muito baixos ou até nulos.

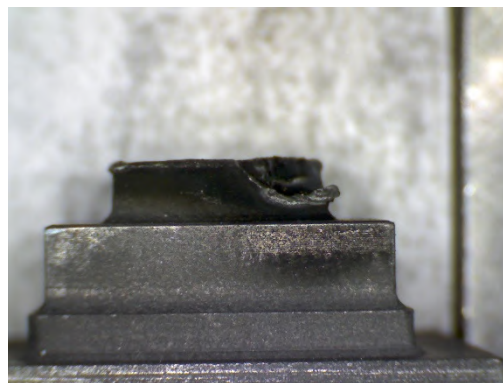
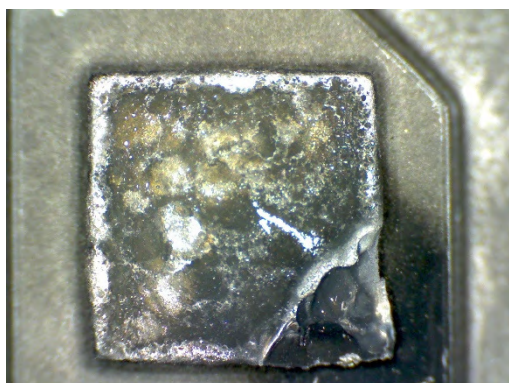
Este facto deve-se a um fenómeno observado em muitos deles que é a formação de uma erupção no eléctrodo (Figura 6.1) e consequente cratera na peça. Este fenómeno provoca a subida do eixo Z durante a maquinação devido à acumulação de detritos na erupção que vai aumentando a sua altura e não deixa que a maquinação termine.



*Figura 6.1 Exemplo de eléctrodo com erupção, vista de topo e perfil*

Estes episódios podem ser explicados por uma combinação de parâmetros que promovem a passagem de descargas intensas, durante um período de tempo prolongado e sem promover a limpeza de detritos. Na prática o eléctrodo mantém-se junto à peça e em descarga durante muito tempo, sem limpeza e produzindo uma energia térmica muito grande, fundindo o material. Quando ocorre o fenómeno toda a corrente é descarregada apenas num ponto fundindo o material pontualmente. A acumulação de detritos fundidos vai aumentando com o decorrer da maquinação.

Outro fenómeno observado é o da criação de crateras no eléctrodo (Figura 6.2). Ocorre associado mais uma vez à passagem de correntes muito elevadas durante período muito prolongados. Nestes casos as descargas são de tal maneira intensas que chegam a ser explosivas, fundindo o grafite e provocando arcos eléctricos que são observados como clarões (flashes).



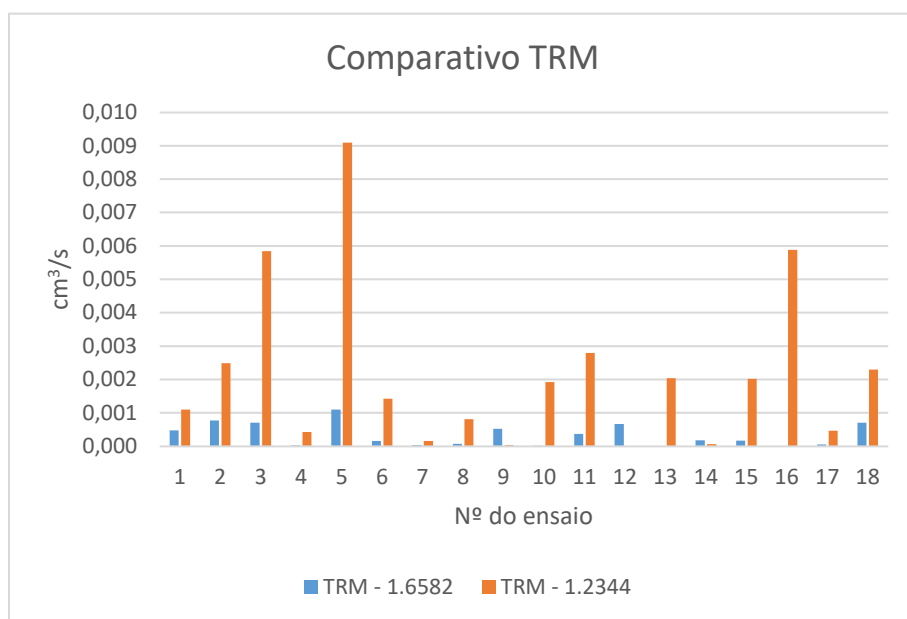
*Figura 6.2 Exemplo de eléctrodo com cratera, vista de topo e perfil.*

Todos estes fenómenos sugerem bastante instabilidade em todo o processo, por isso podemos desde já concluir que o processo de erosão de penetração requer um conhecimento profundo sobre os parâmetros utilizados e seus efeitos. Talvez tenha havido alguns erros no planeamento das experiências que podem ser atribuídos à in experiência neste tipo de estudos.

A escolha dos níveis para o parâmetro ON não foi a mais correta. Como nível 1 (de valor mais baixo) temos o parâmetro máquina com valor 500, o que se pode traduzir num tempo elevado de descarga. Analisando IP verificamos que este varia entre 12 A e 100 A, o que se traduz em uma corrente elevadíssima. O mesmo sucedeu com os parâmetros UP e DN pois os níveis 2 e 3 temos um valor máquina de 410 e 800 respetivamente que corresponde a um valor nominal de 4,1s e 8s para os movimentos de subida e descida. Como podemos imaginar estes valores têm um impacto muito grande no processo pois no caso do movimento ascendente UP, este ao ser muito elevado apenas aumenta a amplitude do movimento não trazendo melhoria ao processo, no caso do movimento descendente DN, o tempo que o eléctrodo permanece junto da peça, que corresponde ao tempo de descarga, aumenta promovendo a falta de limpeza, que em conjunto com os restantes fatores desencadeia a ocorrência dos fenómenos descritos anteriormente. Os níveis foram escolhidos de forma a centrar a gama no universo de valores possíveis. Pela análise feita a gama de valores para os parâmetros referidos deveria estar deslocada para valores mais baixos.

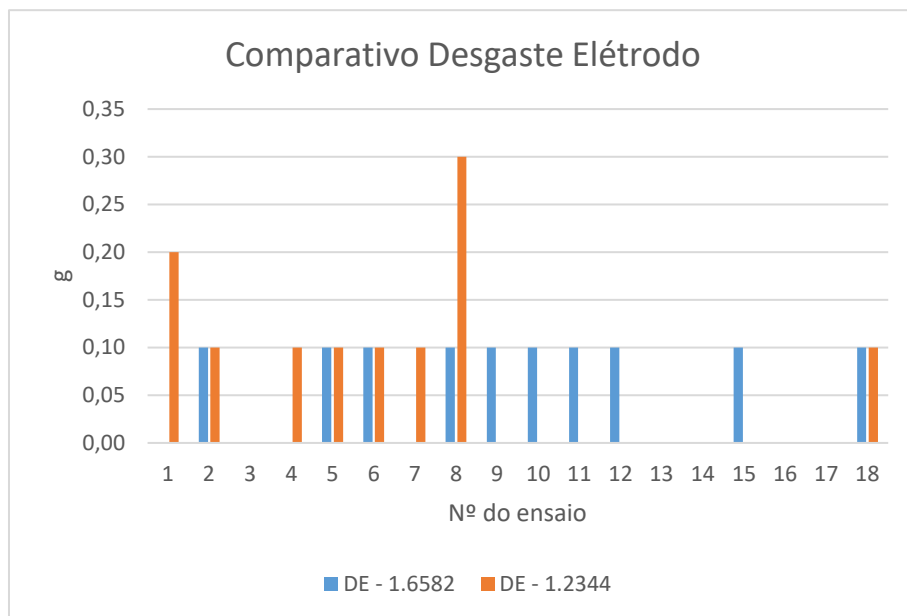
A profundidade de erosão foi demasiado reduzida (0,5mm) pois em alguns ensaios bem sucedidos, não foi possível detetar desgaste no eléctrodo. Pelas características do processo o desgaste terá de existir, mas pode ser de tal forma pequeno que não seja detetável pelo equipamento utilizado. Aumentando a profundidade de erosão esse desgaste seria mais facilmente mensurável.

Analisando os resultados graficamente chegamos às seguintes Figuras.



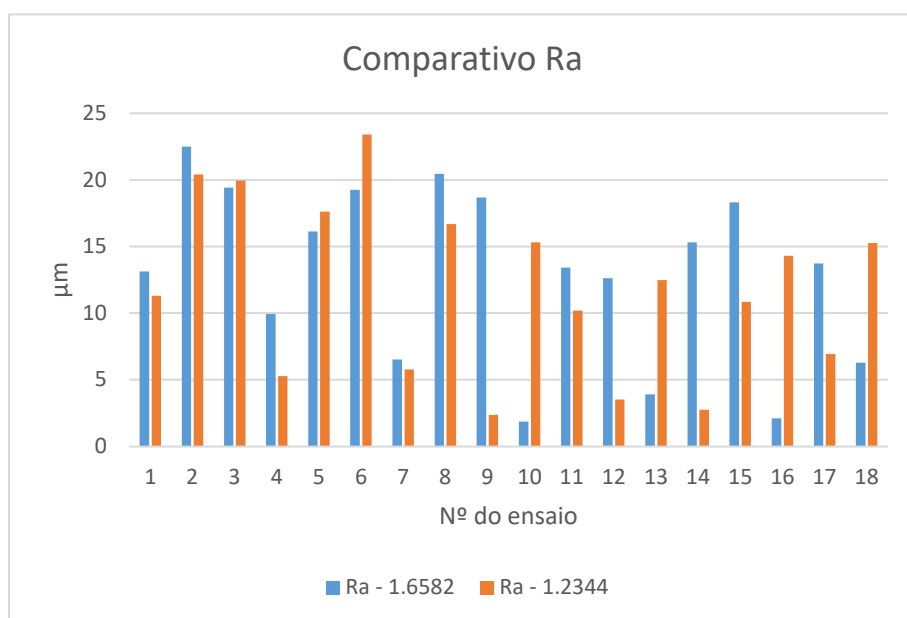
**Figura 6.3 Gráfico comparativo da TRM nos aços utilizados**

Verifica-se na Figura 6.3 que para o aço 1.2344 (temperado) obtêm-se TRM bastante mais elevadas do que no aço 1.6582. Este facto atribui-se a um conjunto de fatores que podem ser analisados nas fichas técnicas dos aços em questão (Anexo VI). A Condutibilidade térmica e o Coeficiente de Dilatação Térmica são superiores no aço pré-tratado (1.6582) o que pode promover a ocorrência dos fenómenos de instabilidade descritos anteriormente. Com os tempos de descarga elevados o material conduz melhor a temperatura e dilata mais, fundindo mais facilmente que o temperado. Isto instabiliza o processo e cria grandes quantidades de detritos que ao isolarem pontualmente a peça podem resultar nos fenómenos quase explosivos observados nos ensaios. Todos estes fatores influenciam negativamente as Taxas de Remoção de Material.



**Figura 6.4 Gráfico comparativo do DE nos aços utilizados**

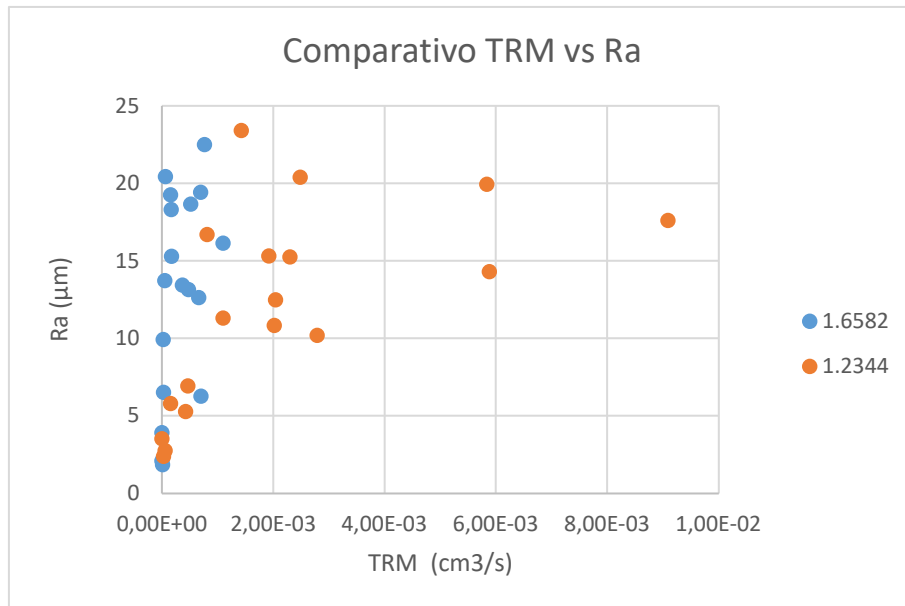
Quanto ao Desgaste do Eléctrodo podemos perceber que em alguns ensaios houve correspondência entre aços, no entanto, como o número de ensaios falhados é grande e a instabilidade da maquinagem predomina, será imprudente tirar conclusões (Figura 6.4).



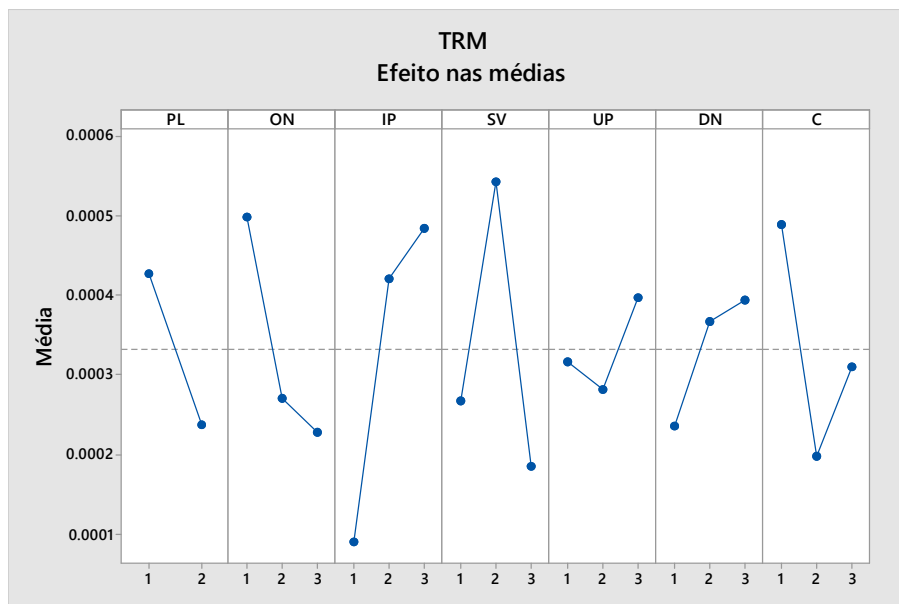
**Figura 6.5 Gráfico comparativo de Ra nos aços utilizados**



No comparativo de rugosidades entre os aços utilizados (Figura 6.5) podemos perceber que existe uma correlação entre eles na maioria dos ensaios, no entanto em alguns ensaios existem discrepâncias grandes que são atribuídas à grande instabilidade do processo e à não concretização de muitos dos ensaios.



Começando por o aço pré-tratado 1.6582 e recorrendo ao software Minitab® chega-se aos seguintes gráficos.



**Figura 6.7** Gráfico do efeito nas médias da TRM no aço 1.6582

**Tabela 6.1** Valores da transformação de dados para as respostas médias

Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	0,000427	0,000498	0,000091	0,000267	0,000317	0,000235	0,000489
2	0,000237	0,00027	0,000421	0,000543	0,000281	0,000367	0,000197
3		0,000227	0,000484	0,000185	0,000397	0,000393	0,00031
Efeito	0,000189	0,000271	0,000393	0,000358	0,000116	0,000158	0,000291
Posição	5	4	1	2	7	6	3

Analisando a Tabela 6.1 verifica-se que para a característica TRM o parâmetro com mais efeito provoca na resposta é IP e que os três parâmetros mais relevantes são IP, SV e C.

Da Figura 6.7 verificamos que utilizando o cálculo do Tipo L os níveis que maximizam a Taxa de Remoção de Material são os expressos na Tabela 6.2.

**Tabela 6.2** Níveis que maximizam a TRM por análise de S/N

PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	1	3	2	3	3	1

De seguida faz-se uma análise da razão sinal-ruído que indicará quais os parâmetros que mais efeito causam na variação da TRM.

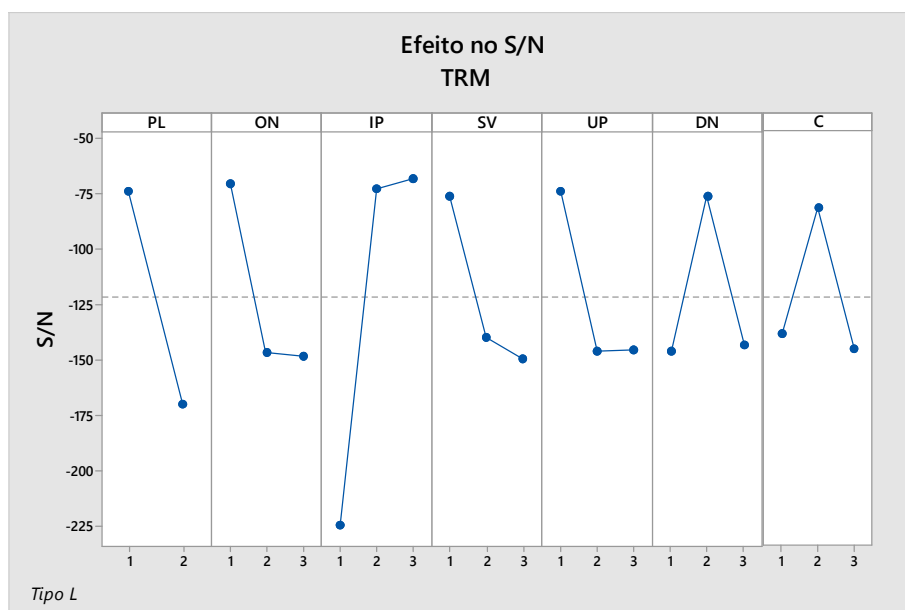


Figura 6.8 Gráfico do efeito no S/N da TRM no aço 1.6582

Tabela 6.3 Valores da transformação de dados para a razão S/N médios no aço 1.6582

Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	-73,26	-70,14	-224,37	-75,75	-73,42	-145,94	-138,34
2	-169,88	-146,35	-72,48	-139,85	-146,17	-75,84	-81,29
3		-148,22	-67,87	-149,11	-145,13	-142,93	-145,08
Efeito	96,62	78,08	156,5	73,35	72,76	70,1	63,79
Posição	2	3	1	4	5	6	7

Mais uma vez verifica-se pela Tabela 6.3 que o parâmetro IP é o que mais efeito causa na variação da TRM, no entanto os parâmetros mais relevantes nesta análise passam a ser IP, PL e ON.

Da Figura 6.8 retiram-se os níveis ótimos para maximizar TRM, Tabela 6.4.

Tabela 6.4 Níveis que maximizam a TRM pela razão sinal-ruído no aço 1.6582

PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	1	3	1	1	2	2

Comparando a Tabela 6.2 e 6.4 verifica-se que os parâmetros que maior efeito causam na resposta não são os mesmo que atuam na variação.

Fazendo o mesmo procedimento de análise para as restantes características de qualidade chega-se à Tabela 6.5 que resume os melhores níveis para o objetivo pretendido. São também indicados os três níveis mais significativos, sendo o mais significativo identificado a amarelo e os outros dois a laranja.

Os gráficos e tabelas correspondentes podem ser consultados no Anexo IX e X.

***Tabela 6.5 Resumo de melhores níveis para os parâmetros de maquinagem analisados pelas médias e S/N no aço 1.6582***

		PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
TRM	Médias	1	1	3	2	3	3	1
	S/N	1	1	3	1	1	2	2
DE	Médias	**	**	1	**	**	**	**
	S/N	1	1	1	2	2	2	2
Ra	Médias	2	3	1	2	3	2	3
	S/N	1	2	2	1	2	1	1

Podemos perceber que analisando o efeito nas médias para a característica DE, apenas o parâmetro IP é significativo, sendo que os restantes não têm significado por apresentarem dois níveis ótimos, Anexo IX.

Conclui-se que este facto é proveniente de em muitos ensaios o resultado do DE ter sido zero. Como exposto anteriormente, para mitigar este efeito, seria necessário aumentar a profundidade de erosão para que o desgaste no elétrodo aumentasse e utilizar uma balança com uma resolução menor que permitisse medir menores diferenças de peso.

Verifica-se também que os melhores níveis pela análise das médias (efeito na resposta) não correspondem aos melhores níveis pela análise da razão sinal-ruído (efeito na variação), por isso ajusta-se os níveis menos significativos da análise das médias aos mais significativos da análise S/N.

Nos casos em que ambos os níveis são *não significativos* ou são ambos significativos pelos dois tipos de análise deu-se preferência à análise das médias visto ser mais interessante o efeito na resposta para este estudo.

De seguida recorremos ao software Minitab® para executar a análise de variâncias ANOVA.

Sabemos que temos um parâmetro com dois níveis e seis com três níveis e isso traduz-se em graus de liberdade diferentes para o cálculo do  $F_{\text{crítico}}$ .

Assim sendo temos:

$$F_{(\alpha, nF, nE)} = F_{(0.05, 1, 4)} = 7,71 \text{ (apenas válido para o fator PL)}$$

$$F_{(\alpha, nF, nE)} = F_{(0.05, 2, 4)} = 6,94 \text{ (válidos para os restantes fatores)}$$

Da comparação dos  $F_c$  com os  $F_0$  que constam nas tabelas do Anexo XI, percebemos que apenas para Ra o fator PL e IP são significativos, para as outras características nenhum fator é significativo pela análise de variâncias. O que para Ra, apenas confirma os resultados já alcançados na análise das médias e razão sinal-ruído.

**Tabela 6.6 Melhores níveis ajustados para o aço 1.6582**

	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
TRM	1	1	3	2	3	2	1
DE	1	1	1	2	2	2	2
Ra	2	3	1	2	3	2	3

Da análise da Tabela 6.6 percebe-se que o parâmetro mais relevante para todas as características de qualidade estudadas é IP. Observando parâmetro a parâmetro para as três características percebe-se que para PL querendo maximizar TRM e minimizar DE escolhe-se o nível 1, no entanto para minimizar Ra o melhor nível será 2, que são valores opostos.

O mesmo sucede com ON tendo em conta que para minimizar Ra deve ser escolhido o nível 3.

Já para IP a TRM é maximizada com correntes altas, nível 3, como era espectável, maior corrente elétrica equivale a maior energia térmica produzida e por isso melhor desempenho na remoção de material. Para o DE e Ra deve ser escolhido o nível 1, que mais uma vez é o limite oposto.

No caso de SV e DN, embora sejam significativos, os seus níveis ótimos são iguais para todas as características de qualidade (nível 2).

Quanto a UP percebe-se que não é um parâmetro com grande variação nas diferentes características de qualidade e apenas é significativo na análise S/N para o Desgaste do Eléctrodo, ou seja apenas tem relevância na variância da característica.

Para C percebe-se que este tem impacto tanto no Desgaste como na Rugosidade final obtida, embora não seja significativo para Ra.

Desta análise conclui-se que não é possível otimizar as três características de qualidade em simultâneo, ou seja, apenas com um ciclo de erosão. Isto porque tendo em conta apenas IP, vemos que para maximizar TRM teremos de ter nível 3 enquanto que para minimizar DE e Ra teremos que utilizar o nível oposto (nível 1) onde as correntes são baixas e a energia transferida é inferior.

Por isso propõe-se um modelo de maquinagem com dois ciclos de erosão, onde maximizaremos a TRM no primeiro ciclo e de seguida minimizaremos o DE e Ra. Designam-se então como ciclo de desbaste e ciclo de acabamento (Tabela 6.7).

**Tabela 6.7 Níveis ótimos para o modelo de maquinagem**

		PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
Ciclo Desbaste	↗ TRM	1	1	3	2	3	2	1
Ciclo Acabamento	↘ DE ↘ Ra	2	3	1	2	3	2	3

Deu-se preferência a Ra no Ciclo de Acabamento, visto a maior quantidade de material a remover ser maquinado no ciclo de desbaste, e pressupõem-se que não restará muito material a maquinar no ciclo de acabamento, logo é preferível minimizar a rugosidade ao máximo.

Substituindo os níveis por parâmetros máquina ficamos com a Tabela 6.8.

**Tabela 6.8 Modelo de maquinagem com parâmetros máquina**

		PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
Ciclo Desbaste	↗ TRM	-	500	25	55	800	410	2
Ciclo Acabamento	↘ DE ↘ Ra	+	998	3	55	800	410	4

Foram então executados ensaios de verificação do modelo apresentado.

Realizaram-se três tipos de ensaios diferentes. Um apenas de desbaste (B1), outro apenas de acabamento (D1) e outro onde são executados os dois ciclos (desbaste e acabamento) com o mesmo eletrodo (B2).

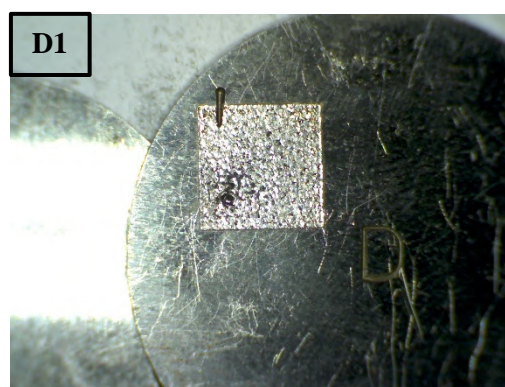
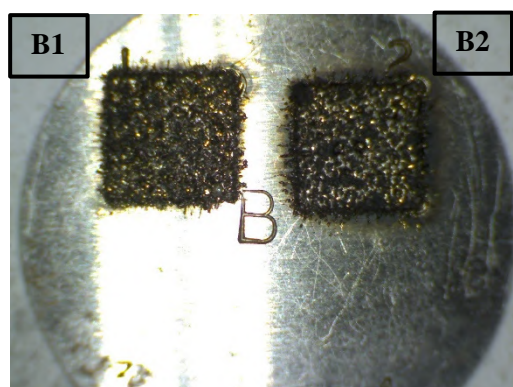
Foram registadas as mesmas características que nos ensaios anteriores, tempo de execução, pesos iniciais e finais dos eletrodos e provetes.

Mais uma vez nota-se bastante instabilidade. A descarga elétrica não é constante ocorrendo arcos elétricos (Figura 6.9).

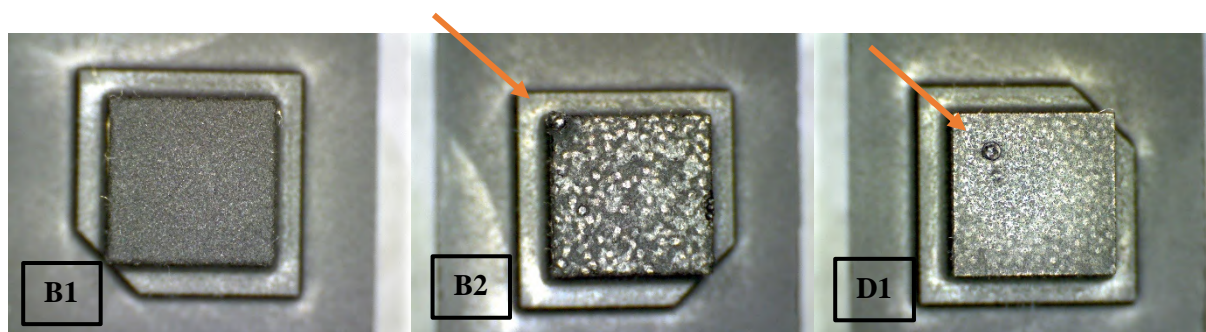
Ambos os ciclos de acabamento não foram conclusivos sendo que no ensaio D1 (apenas acabamento), cerca de 5 min após o início, a cota Z começou a aumentar. Formou-se uma erupção no eletrodo (assinada com seta laranja – Figura 6.11) devido ao tempo de descarga ser muito elevado, não promovendo a limpeza dos detritos que com a energia térmica acumulada se aglomeram criando depósito. Este fenómeno foi observado em muitos dos ensaios anteriores, e caracteriza-se pela formação de uma ou mais erupções no eletrodo e consequente cratera na peça (Figura 6.10). Com o tempo a erupção vai aumentando e consequentemente a cota no eixo Z vai subindo, e assim a maquinagem nunca termina. O facto de as erupções existirem faz com que a passagem da corrente elétrica se dê apenas por esses pontos, concentrando muita a energia neles o que agrava ainda mais o fenómeno.



*Figura 6.9 Exemplo de maquinagem com arco elétrico*



*Figura 6.10 Provetes de ensaios de confirmação no aço 1.6582*



*Figura 6.11 Eléttodos dos ensaios de confirmação no aço 1.6582*

Mesmo os ciclos de acabamento sendo falhados, percebe-se comparando B1 e B2 (ciclos onde se executou o desbaste) com D1 (apenas acabamento) que a rugosidade baixou.

Os fenómenos de erupção observados nos ensaios de confirmação podem mais uma vez ser atribuídos à má escolha dos níveis para os parâmetros ON, UP e DN.

*Tabela 6.9 Resultados dos ensaios de confirmação no aço 1.6582*

Provete	Ciclo	PR (g)	Tempo (s)	TRM (cm <sup>3</sup> /s)	DE (g)	$\overline{Ra}$	$\sigma Ra$
B1	Desbaste	0,6	29	2,64E-03	0,1	21,07	0,582
D1	Acabamento	0,1	390	3,27E-05	0,1	2,25	0,622
B2	Desbaste + acabamento	0,5	448	1,46E-04	0	18,17	0,728

Comprando os resultados dos ensaios anteriores (Tabela 5.1) com os resultados do ensaio de confirmação (Tabela 6.) no ciclo de desbaste (B1), observa-se uma melhoria em TRM sendo que este aumentou para mais do dobro comparando com o melhor valor obtido nos ensaios anterior (ensaio 5 → 1,1E-03 cm<sup>3</sup>/s), e aumentou uma ordem de grandeza comparando com a média das TRM obtidas anteriormente. No entanto a rugosidade média aumentou o que vem confirmar a conclusão já exposta, o Tempo de execução e a Rugosidade são parâmetros cruzados, para que um aumente o outro tem de diminuir e vice-versa.

Quanto aos ciclos de acabamento e desbaste+acabamento não se observam alterações notórias relativamente aos ensaios anteriores.



Seguindo a mesma metodologia para o aço temperado 1.2344 chegamos à Tabela 6.10.

**Tabela 6.10 Resumo de melhores níveis para os parâmetros de maquinagem analisados pelas médias e S/N no aço 1.2344**

		PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
TRM	Médias	1	2	2	**	3	3	1
	S/N	1	2	1	3	3	3	3
DE	Médias	2	**	3	1	3	3	**
	S/N	1	2	1	2	1	1	3
Ra	Médias	2	3	1	1	1	2	1
	S/N	1	1	2	3	3	3	3

Fazendo de novo a análise de variâncias ANOVA chegamos às tabelas do Anexo XV onde podemos verificar que neste caso nenhum fator é significativo para nenhuma característica de qualidade.

**Tabela 6.11 Melhores níveis ajustados para o aço 1.2344**

	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
<b>TRM</b>	1	2	1	3	3	3	3
<b>DE</b>	2	2	3	2	3	3	3
<b>Ra</b>	2	3	1	1	1	3	3

Podemos perceber que os resultados são dispares e contrários aos encontrados anteriormente. Os parâmetros significativos para cada característica de qualidade são diferentes. A análise ANOVA confirma a afirmação anterior. Este facto atribui-se à grande instabilidade observada na generalidade dos ensaios, o que pode ter originado grandes desvios nos resultados obtidos.

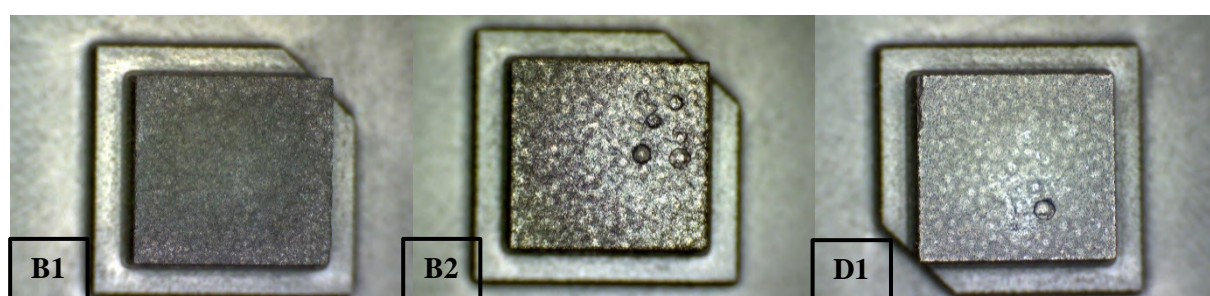
Foram realizados ensaios de confirmação com os novos parâmetros encontrados (Tabela 6.11 e Tabela 6.12) seguindo a mesma filosofia anterior.

**Tabela 6.12 Modelo de maquinagem com parâmetros máquina**

		PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
Ciclo Desbaste	↗ TRM	-	994	3	100	800	800	4
Ciclo Acabamento	↘ DE ↘ Ra	+	998	3	10	20	800	4



*Figura 6.12 Provetes de ensaios de confirmação no aço 1.2344*



*Figura 6.13 Eléttodos dos ensaios de confirmação no aço 1.2344*

Mais uma vez os ensaios não foram conclusivos, mas neste caso os tempos de maquinagem aumentaram bastante (Tabela 6.13), o que fez diminuir muito TRM comparativamente aos ensaios anteriores no mesmo aço. As restantes características também não melhoraram significativamente. Observaram-se os mesmos fenómenos descritos anteriormente, erupções e crateras nos eléctrodos e peças (Figura 6.12 e Figura 6.13).

*Tabela 6.13 Resultados dos ensaios de confirmação no aço 1.2344*

Proвете	Ciclo	PR (g)	Tempo (s)	TRM (cm <sup>3</sup> /s)	DE (g)	$\bar{Ra}$	$\sigma Ra$
B1	Desbaste	0,1	1946	6,55E-06	0	5,67	1,064
D1	Acabamento	0	542	0	0	2,79	0,249
B2	Desbaste+Acabamento	0,1	910	1,96E-05	0	4,19	0,325

Pode-se concluir que o segundo modelo apresentado não acrescenta nenhuma melhoria no processo.

## 7 Conclusões e Trabalhos Futuros

Esta Dissertação tem como objetivo a otimização de parâmetros de maquinagem em eletroerosão de penetração com vista a melhorar o processo produtivo nas empresas da indústria dos moldes. Este é um processo bastante significativo economicamente em toda a conceção do molde e que traz grandes mais valias na sua otimização.

Para o efeito foi utilizada a metodologia de Taguchi para encontrar os parâmetros ótimos que maximizam ou minimizam as características de qualidade pretendidas. Esta metodologia permite a redução drástica do número de ensaios a realizar.

Foram identificados todos os parâmetros existentes e escolhidos os passíveis de otimização tendo em conta que apenas queríamos estudar as respostas TRM, DE e Rugosidade. Como parâmetros a otimizar tínhamos a Polaridade (PL), o tempo de descarga pulsada (ON), corrente de pico (IP), tensão no servo (SV), condensador (C), tempo de subida/descida (UP) e tempo de descarga (DN), sendo seis destas variáveis contínuas e uma discreta.

Depois de escolhidos os níveis, planearam-se os ensaios seguindo uma matriz ortogonal de Taguchi L18 em que uma variável assume dois níveis e as restantes assumem três níveis.

Foram executados os ensaios e analisaram-se os resultados através das respostas médias e da razão sinal-ruído. Desta análise conclui-se que, tal como observado durante os ensaios, a instabilidade do processo predominou e pode ter deturpado os resultados. Pode também dizer-se que a instabilidade provém de uma má escolha de níveis para alguns parâmetros, nomeadamente ON, IP, UP e DN, isto é, tendo em conta a gama total de valores possíveis para o parâmetro e escolhendo apenas três níveis centrados dentro dessa mesma gama, obtêm-se discrepâncias muito grandes em valor nominal. Este facto gera combinações de parâmetros que podem ser muito estremadas, existindo no mesmo ensaios parâmetros com valores demasiado altos combinados com outros de valor demasiado baixos (valores nominais) o que promove a instabilidade. Quando a energia e o tempo de descarga aumentam, provoca instabilidade no processo, ocorrendo acumulação de detritos e arcos elétricos com potencial para provocar danos tanto no eléctrodo como na peça. Este facto vai de encontro às conclusões retiradas de outros estudos feitos no tema [8].

No entanto através da análise dos resultados foi possível observar que para as características de qualidade que queremos otimizar não é de todo possível otimizar todas apenas com um ciclo e por isso propõe-se dois modelos empíricos de maquinagem. Estes modelos assentam numa lógica de desgaste e acabamento em que no primeiro é otimizada a TRM e no segundo se otimiza DE e Ra. Os modelos foram ensaiados e os resultados não foram satisfatórios estando mais uma vez predominante a instabilidade do processo. Observou-se ainda assim uma melhoria na Taxa de Remoção de Material o

que nos leva a concluir que através de um processo iterativo se pode chegar a um modelo empírico de maquinagem com bons resultados.

Conclui-se também que o objetivo da Dissertação não foi conseguido pois não foi possível encontrar um modelo empírico de maquinagem que satisfaça as condições pretendidas.

Propõe-se em Estudos Futuros que sejam alteradas as gamas dos parâmetros referidos para uma gama com valores nominais inferiores, e que sejam utilizados outros métodos de planeamento de experiência, nomeadamente resposta em superfície, pois é previsível que seja um método mais adequado a estudos deste carácter.

Seria também interessante fazer um estudo idêntico, mas com o objetivo de otimizar o rigor e precisão geométrica. É também um fator de grande interesse na indústria.

Conclui-se ainda que o processo de erosão de penetração requer um conhecimento profundo das características do mesmo e das interações entre parâmetros de maquinagem. É um processo difícil de estudar por ter muitas variáveis influentes e correlacionadas que outros processos de maquinagem não têm.

## Referências Bibliográficas:

- [1] C. M. M. Machado, “Modelos Estatísticos Para a Caraterização De Texturas Produzidas Por Electroerosão,” Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2002.
- [2] T. Rajmohan, R. Prabhu, G. S. Rao, and K. Palanikumar, “Optimization of Machining Parameters in Electrical Discharge Machining (EDM) of 304 Stainless Steel,” *Procedia Eng.*, vol. 38, pp. 1030–1036, 2012.
- [3] A. R. Motorcu, E. Ekici, and A. Kuş, “Investigation of the WEDM of Al/B4C/Gr reinforced hybrid composites using the Taguchi method and response surface methodology,” *Sci. Eng. Compos. Mater.*, 2015.
- [4] G. D’Urso and C. Merla, “Workpiece and electrode influence on micro-EDM drilling performance,” *Precis. Eng.*, vol. 38, no. 4, pp. 903–914, 2014.
- [5] S. Barman, Vijay, Nagahanumaiah, and A. B. Puri, “Surface Texture and Elemental Characterization of High Aspect Ratio Blind Micro Holes on Different Materials in Micro EDM,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmpe, pp. 304–309, 2014.
- [6] J. Stráský, J. Havlíková, L. Bačáková, P. Hrcuba, M. Mhaede, and M. Janeček, “Characterization of electric discharge machining, subsequent etching and shot-peening as a surface treatment for orthopedic implants,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 281, pp. 73–78, 2013.
- [7] A. Ntasi, W. D. Mueller, G. Eliades, and S. Zinelis, “The effect of Electro Discharge Machining (EDM) on the corrosion resistance of dental alloys,” *Dent. Mater.*, vol. 26, no. 12, pp. e237–e245, 2010.
- [8] M. Boujelbene, E. Bayraktar, W. Tebni, and S. Ben Slaem, “Influence of machining parameters on the surface integrity in electrical discharge machining,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 76–78, no. 2, pp. 613–617, 2009.
- [9] N. Moita, “Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de moldes para injeção de plásticos Nuno Filipe Vital Curates Moita Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica,” 2007.
- [10] T. Dias, “Otimização dos Parâmetros de Maquinagem no Processo de Fresagem,” 2016.
- [11] C. M. Gonçalves, “Novas Técnicas e Ferramentas para operações de Montagem e Afinação de componentes na indústria de moldes para Injeção Termoplástica: Moldes de Azeméis - MDA,” 2014.
- [12] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, vol. 2. 2012.
- [13] G. S. Peace, *Taguchi Methods*. Addison-Wesley, 1993.

- [14] “Cefamol - Associação Nacional da Indústria de Moldes.” [Online]. Available: [www.cefamol.pt](http://www.cefamol.pt).
- [15] “Tudo Sobre Plásticos.” [Online]. Available: <https://www.tudosobreplasticos.com/processo/cicloinjecao.asp>.
- [16] K. . Ho and S. . Newman, “State of the art electrical discharge machining (EDM),” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, no. 13. pp. 1287–1300, 2003.
- [17] “Novotec | Superior EDM supplies and consumables.” [Online]. Available: <https://www.novotec-edm.com/>.
- [18] Z. L. Pereira and J. G. Requeijo, “Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos,” *Fac. Ciências e Tecnol. - Univ. Nov. Lisboa*, 2012.
- [19] B. M. Gopalsamy, B. Mondal, and S. Ghosh, “Taguchi method and anova: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel,” *J. Sci. Ind. Res. (India)*., vol. 68, no. 8, pp. 686–695, 2009.
- [20] “ISO 2632-2:1985 Roughness comparison specimens -- Part 2: Spark-eroded, shot-blasted and grit-blasted, and polished.” .

# Anexos

## Anexo I Programa CAM de maquinagem dos provetes na erosão por fio

```
( VER : 3.01A Sodick DataBase AGL-Ws_5,0[00] );
( Search Data : Water,Brass
d0.25,Punch,Close,Steel,40.00mm,E=0,20.0umRz,2.95umRa,1times,0.0000 );
( Precision : 6, Condition Pointer : 005100 );
(
ON OFF IP HRP MAO SV V SF C PIK CTRL WK WT WS WP PC SK);
C000 = 012 013 2215 000 240 +040.0 8.0 0060 0 000 0000 025 160 130 045 0000 00;
C001 = 013 013 2215 000 243 +018.0 8.0 0060 0 000 0000 025 160 130 055 0000 00;
H000 = +000000.0100 (Approch) ;
H001 = +000000.1650 ( 1ST ) ;
H999 = +000000.0020 ( Taper Offset ) ;
( Other Information );
(
UP DN ! 1st 2nd~ ! );
(-----!-----!-----!-----);
( Dice : 0.26 0.27 ! PS :15.0 1.0 ! Resi.: 50000 );
( Nozzle: 6.0 6.0 ! UP : 6.0 1.5 ! Taper Offset :0.0020 );
( Distance: 0.1 0.1 ! DN : 6.0 1.5 ! );
QAIC(2,1,0.1250,002.0,0.1650,0.0400,016.0,0011,0038,15,035);
SFCC00070040;
BSAH999;
;
N1TP0.0;
N2TN10.0;
(CONICO CONSTANTE COMENTARIO: );
(GEO 1 - DESBASTE COMPLETO );
(CLE,0.0 MM);
N3G54;
N4G90;
N5G00 X-22.4527 Y0.4325;
N6G92 X-22.4527 Y0.4325 Z0;
N7G29;
N8T94;
N9T84;
N10C000;
N11G41 H000 G01 X-20.6953 Y0.0432;
N12C001 G01 X-20.5 Y0.0;
N13H001;
N14G01 X20.5 Y0.0;
N15H000;
N16G40 G01 X21.2217 Y1.8653;
N17T85;
N18TP0.0;
N19TN10.0;
N20G148G248;
(CONICO CONSTANTE COMENTARIO: );
(GEO 2 - DESBASTE COMPLETO );
(CLE,0.0 MM);
N21G54;
N22G00 X-20.5 Y0.75 U0 V0;
N23G92 X-20.5 Y0.75 Z0;
N24G29;
N25T84;
N26C000;
N27G41 H000 G01 X-20.5 Y-2.85;
N28C001 G01 X-20.5 Y-3.25;
N29H001;
N30G01 X20.5 Y-3.25;
N31H000;
N32G40 G01 X20.5 Y0.75;
N33T85;
N34TP0.0;
N35TN10.0;
N36M02;
```

**Anexo II Certificado de tratamento térmico efectuado no aço DIN: X40 CrMoV5-1, M.nº: 1.2344**



**TTO - Tratamentos Térmicos do Oeste, Lda**

Estrada principal, Cerca, Apartado 47, 2405 Maceira Lis, Portugal  
tto@tratamentostermicos.com | www.tratamentostermicos.com  
Tel 244 776 135 | Fax 244 772 464

**Certificado**

**Relatório de Ensaio Específico**

(de acordo com a secção 3.1 da Norma EN 10 204:2004)

(INSPECTION CERTIFICATE 3.1, IN ACCORDANCE WITH EN 10 204:2004 STANDARD)

Nome do Cliente **Moldes Catarino, Lda.**

CLIENT NAME

Certificado Nr

CERTIFICATE NR

**2015/23242**

Data de Emissão do Certificado

CERTIFICATE ISSUE DATE

**06-01-2016**

Requisição Nr

CLIENT ORDER NR

**2015093 pos. 1  
2**

Data de Entrada da Requisição

ORDER RECEPTION DATE

**29-10-2015 19:00**

Quantidade

QUANTITY

**17**

Descrição

DESCRIPTION

**Peças**

Peso (kg)

WEIGHT

**0,40**

Ref\*

WORK

**1271**

Dureza / HARDNESS

Pretendida

REQUESTED

**48-52**

Obtida

OBTAINED

**48-50**

Peso Total

TOTAL WEIGHT

**0,40 kg**

Tratamento

TREATMENT

**Têmpera a Vácuo**

(Vacuum Hardening)

Foto

PHOTO



Programa

PROGRAM NR

**1307**

Código

TREATMENT CODE

**VT2 (Temp. 901-1100°C)**

Tipo de Dureza

HARDNESS

**HRC**

Camadas (mm)

CASE DEPTH

**-**

Aço

STEEL

**1.2344**

Observações

REMARKS

Responsável

RESPONSIBLE PERSON

**Júlio Oliveira**

Dep. Técnico & Dep. Qualidade  
Technical & Quality Dpt.


Documento processado por computador, válido sem assinatura.

O material foi entregue de acordo com as especificações do cliente, ou aceite por este.

Só são analisadas reclamações sobre este certificado, desde que apresentadas no prazo de 8 dias da data de emissão.



# Anexo III Resumo produtivo dos processos de Fresagem e Erosão



**MOLOS**  
**CATARINO**

**Ficha de Obra**  
  
**Por Peça \ Operação**

Obra nº : **1258**

Designação : **Tool WZ5113407**  
 Cliente : \_\_\_\_\_  
 Encomenda : \_\_\_\_\_

Orçamento : \_\_\_\_\_  
 Experiência : \_\_\_\_\_

Nº Cavidades : \_\_\_\_\_  
 Qt. : **1**

Início : **30/09/2014**

Expedição : \_\_\_\_\_

Trabalho		Tempos (HH:mm)			
Peça	Operação	Funcio. Posto			
➤	100 Cavidade	319:07	642:14		
▶	Desbastes CNC	43:01	43:01		
▶	Fresagem CNC	57:20	227:34		
▶	Erosão de Penetração	87:19	143:33		
▶	Maquinação de Eléctrodos	62:02	158:42		
▶	Modelação de Eléctrodos	69:23	69:23		
➤	200 Bucha	300:32	800:53		
▶	Desbastes CNC	37:52	37:52		
▶	Fresagem CNC	157:38	380:01		
▶	Erosão de Penetração	35:44	91:25		
▶	Maquinação de Eléctrodos	18:48	241:04		
▶	Modelação de Eléctrodos	50:29	50:29		
<b>Sub-Total</b>		<b>619:39</b>	<b>1443:08</b>		

Assinatura(s): \_\_\_\_\_  

(Dep. Compras)

(Dep. Comercial)

(Dep. Financeiro)

Data: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Verificado Por: \_\_\_\_\_ Fechado Em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ Factura nº: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ Valor: \_\_\_\_\_

Obra nº : **1259**
**Por Peça \ Operação**

Designação : Tool WZ5113408

Nº Cavidades :

Cliente :

Orçamento :

Qt. : 1

Encomenda :

Início : 30/09/2014

Experiência :

Expedição :

Trabalho		Tempos (HH:mm)			
Peça	Operação				
		Funcio.	Posto		
➤	100 Cavidade	320:06	668:40		
	Desbastes CNC	69:11	69:11		
	Fresagem CNC	135:49	398:00		
	Erosão de Penetração	63:10	128:41		
	Maquinação de Eléctrodos	18:36	39:29		
	Modelação de Eléctrodos	33:18	33:18		
➤	200 Bucha	394:23	961:42		
	Desbastes CNC	6:34	6:34		
	Fresagem CNC	184:15	447:10		
	Erosão de Penetração	80:26	237:56		
	Maquinação de Eléctrodos	101:16	248:10		
	Modelação de Eléctrodos	21:50	21:50		
<b>Sub-Total</b>		<b>714:29</b>	<b>1630:23</b>		

Assinatura(s):

(Dep. Compras)

(Dep. Comercial)

(Dep. Financeiro)

Data: \_\_/\_\_/\_\_

Data: \_\_/\_\_/\_\_

Data: \_\_/\_\_/\_\_

Verificado Por: \_\_\_\_\_ Fechado Em: \_\_/\_\_/\_\_ Factura nº: \_\_\_\_\_ Data: \_\_/\_\_/\_\_ Valor: \_\_\_\_\_

**Por Peça \ Operação**

Designação : **8803 V316 UPV2**

Nº Cavidades :

Cliente :

Orçamento :

Qt. : 1

Encomenda :

Início : 15/03/2016

Experiência : 14/07/2016

Expedição :

Trabalho		Tempos (HH:mm)			
Peça	Operação				
		Funcio.	Posto		
➤	100 Cavidade	180:56	398:15		
▶	Desbastes CNC	14:32	23:27		
▶	Acabamento CNC	28:58	60:57		
▶	Erosão de Penetração	42:27	55:34		
▶	Maquinação de Eléctrodos	71:06	234:24		
▶	Modelação de Eléctrodos	23:51	23:51		
➤	200 Bucha	91:51	166:35		
▶	Desbastes CNC	21:16	34:52		
▶	Acabamento CNC	30:01	46:55		
▶	Erosão de Penetração	13:43	27:04		
▶	Maquinação de Eléctrodos	23:18	54:12		
▶	Modelação de Eléctrodos	3:31	3:31		
<b>Sub-Total</b>		<b>272:47</b>	<b>564:50</b>		

Assinatura(s):

(Dep. Compras)

(Dep. Comercial)

(Dep. Financeiro)

Data: \_\_/\_\_/\_\_

Data: \_\_/\_\_/\_\_

Data: \_\_/\_\_/\_\_

Verificado Por: \_\_\_\_\_ Fechado Em: \_\_/\_\_/\_\_ Factura nº: \_\_\_\_\_ Data: \_\_/\_\_/\_\_ Valor: \_\_\_\_\_

Obra nº : **1308**
**Por Peça \ Operação**

Designação : **Momentenabstützung FRT LH+RH + RR LH+RH**

Nº Cavidades : **1+1+1+1**

Cliente :

Orçamento : **16/061**

Qt. : **1**

Encomenda :

Início : **19/07/2016**

Experiência :

Expedição :

Trabalho		Tempos (HH:mm)			
Peça	Operação				
		Funcio.	Posto		
100 Cavidade		179:51	382:30		
	Desbastes CNC	18:07	18:07		
	Fresagem CNC	4:21	4:21		
	Acabamento CNC	84:47	212:45		
	Erosão de Penetração	37:00	46:07		
	Maquinação de Eléctrodos	14:09	79:44		
200 Bucha	Modelação de Eléctrodos	21:25	21:25		
		349:56	905:02		
	Desbastes CNC	14:56	14:56		
	Fresagem CNC	10:31	14:46		
	Acabamento CNC	148:18	318:09		
	Erosão de Penetração	58:51	124:02		
Sub-Total		63:32	379:21		
		53:46	53:46		

Assinatura(s):

(Dep. Compras)

(Dep. Comercial)

(Dep. Financeiro)

Data: / /

Data: / /

Data: / /

Verificado Por: \_\_\_\_\_ Fechado Em: / / Factura nº: \_\_\_\_\_ Data: / / Valor: \_\_\_\_\_

**Por Peça \ Operação**

Designação : **Halter Jetta BSD Links & Halter Jetta BSD Rechts**

Nº Cavidades : **1+1**

Cliente :

Orçamento :

Qt. : **1**

Encomenda : **NPP16-03071**

Início : **22/11/2016**

Experiência :

Expedição :

Trabalho		Tempos (HH:mm)			
Peça	Operação				
		Funcio.	Posto		
➤	100 Cavidade	158:02	315:46		
	▶ Desbastes CNC	15:36	16:31		
	▶ Fresagem CNC	2:46	2:46		
	▶ Acabamento CNC	45:11	78:56		
	▶ Erosão de Penetração	59:38	85:54		
	▶ Maquinação de Eléctrodos	18:07	114:53		
	▶ Modelação de Eléctrodos	16:43	16:43		
➤	200 Bucha	148:40	320:34		
	▶ Desbastes CNC	21:35	25:45		
	▶ Acabamento CNC	66:30	153:54		
	▶ Erosão de Penetração	17:41	30:36		
	▶ Maquinação de Eléctrodos	29:53	97:19		
	▶ Modelação de Eléctrodos	12:58	12:58		
<b>Sub-Total</b>		<b>306:43</b>	<b>636:21</b>		

Assinatura(s):

(Dep. Compras)

(Dep. Comercial)

(Dep. Financeiro)

Data: \_\_/\_\_/\_\_

Data: \_\_/\_\_/\_\_

Data: \_\_/\_\_/\_\_

Verificado Por: \_\_\_\_\_ Fechado Em: \_\_/\_\_/\_\_ Factura nº: \_\_\_\_\_ Data: \_\_/\_\_/\_\_ Valor: \_\_\_\_\_

## Anexo IV Exemplo de programa CAM de chamada de parâmetros de erosão de penetração

```
(--- REFERENCIA - G54 --1^ PROVETE);  
;  
(POSICIONA);  
G54 Z20.0;  
X-7.0 Y7.0;  
Z5.0;  
;  
(MEDE ALTURA ELETRODO);  
G80Z-;  
G92Z;  
M05 Z1.0;  
;;  
(ERODE);  
QLGT1(0.50,0.150,0.127,0.127,00,1,1.000,1);  
G54 Z20.00;  
;  
M02;  
;  
(--- REFERENCIA - G55--2^ PROVETE-);  
;  
(POSICIONA);  
G55 Z20.0;  
X-7.0 Y7.0;  
Z5.0;  
;  
(MEDE ALTURA ELETRODO);  
G80Z-;  
G92Z;  
M05 Z1.;  
;  
  
(ERODE);  
QLGT1(0.50,0.150,0.094,0.094,00,1,1.000,1);  
G55Z20.00;  
;  
M02;
```

**\*\*continua\*\***

```
**continuação**  
(--- REFERENCIA - G56 ---3^ PROVETE);  
;  
(POSICIONA);  
G56 Z20.0;  
X-7.0 Y7.0;  
Z5.0;  
;  
(MEDE ALTURA ELETRODO);  
G80Z-;  
G92Z;  
M05 Z1.;  
;  
(ERODE);  
QLGT1(0.50,0.150,0.076,0.076,00,1,1.000,1);  
G56 Z20.00;  
;  
M02;  
;  
;  
(--- REFERENCIA - G57 ---4^ PROVETE);  
;  
(POSICIONA);  
G57 Z20.0;  
X-7.0 Y7.0;  
Z5.0;  
;  
(MEDE ALTURA ELETRODO);  
G80Z-;  
G92Z;  
M05 Z1.;  
;  
  
(ERODE);  
QLGT1(0.50,0.150,0.061,0.061,00,1,1.000,1);  
G57 Z20.00;  
;  
M02;
```

## Anexo V Exemplo de programa CAM com parâmetros de maquinagem

```
(      PL ON OFF IP SV S UP DN JS LNS STEP V HP PP C ALV OC LF JM LS LNM Série 1);
C505 = - 0500 0220 003.0 010 55 020 020 018 0000 0.0000 02 000 00 2 0000 0000 0000 00 00 000;
C504 = - 0500 0220 014.0 055 55 410 410 018 0000 0.0000 02 000 00 3 0000 0000 0000 00 00 000;
C503 = - 0500 0220 025.0 100 55 800 800 018 0000 0.0000 02 000 00 4 0000 0000 0000 00 00 000;
C502 = - 0994 0765 003.0 010 55 410 410 018 0000 0.0000 02 000 00 4 0000 0000 0000 00 00 000;
;
H000 = +000000.5000 (INSERT FINISHED DEPS ) ;
H010 = +000000.1500 (INSERT EL UNDER SIZE ) ;
H020 = +000000.0760 (INSERT 1ST OB ) ;
H030 = +000000.0760 (INSERT FINAL OB ) ;
H040 = +000000.0000 (INSERT ORBIT CORRECTION LORAN ) ;
H050 = +000000.0001 (INSERT LORAN PATTERN LORAN PC Q ) ;
H060 = +000001.0000 (INSERT Z POSITION );
H070 = +000000.0001 ( );
;
IF H010 =>.127 (2009,2010);
N2009;
H020 = .127;
JUMP 0102;
N2010;
IF H010 =>.094 (2011,2012);
N2011;
H020 = .094;
JUMP 0102;
N2012;
IF H010 =>.076 (2013,2014);
N2013;
H020 = .076;
JUMP 0102;
N2014;
IF H010 =>.061 (2015,9996);
N2015;
H020 = .061;
;
JUMP 0102;
;
N0100;
;
KEYIN(H000) (INSERT FINISHED DEPTH);
;
KEYIN(H010) (INSERT ELECTRODE UNDERSIZE P/S ) ;
;
KEYIN(H020) (INSERT 1ST OVER BURN ) ;
;
KEYIN(H030) (INSERT FINAL OVER BURN ) ;
;
KEYIN(H040) (INSERT ORBIT CORRECTION ) ;
;
KEYIN(H050) (INSERT LORAN PATTERN ) ;
;
KEYIN(H060) (INSERT Z AXIS STARTING POSITION ) ;
;
IF H020 =0.127 (5000,5005);
N5005;
IF H020 =0.094 (5000,5006);
N5006;
IF H020 =0.076 (5000,5007);
N5007;
IF H020 =0.061 (5000,9996);
N5008;

N5000;
IF H030 =0.127 (5500,5017);
N5017;
IF H030 =0.094 (5500,5018);
N5018;
IF H030 =0.076 (5500,5019);
N5019;
IF H030 =0.061 (5500,9996);
```

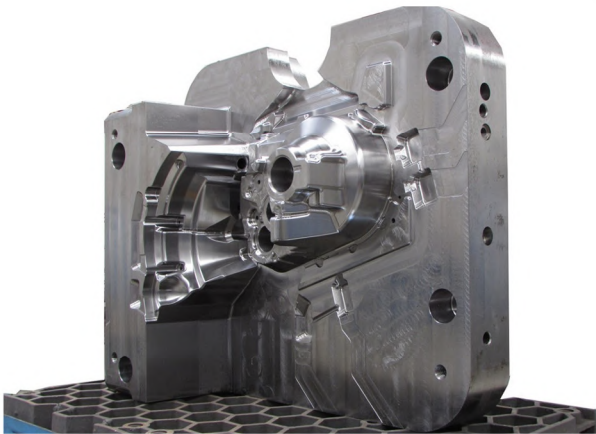
```

;
N5500;
;
(-----ERODE-----);
;
G0 Z+H60;
G555 G92 X Y Z+H60+H0;
M98 P6000+H20/10;
;
N6127;
G24;
C505 STEP0 LNS0;
G1 Z0 M4;
G0 Z9.-H10+.330;
;
IFH30=0.127 (9997,6094);
;
N6094;
G24;
C504 STEP0 LNS0;
G1 Z0 M4;
G0 Z9.-H10+.330;
;
IFH30=0.094 (9997,6076);
;
N6076;
G24;
C503 STEP0 LNS0;
G1 Z0 M4;
G0 Z9.-H10+.330;
;
IFH30=0.076 (9997,6061);
;
N6061;
G24;
C502 STEP0 LNS0;
G1 Z0 M4;
G0 Z9.-H10+.330;
;
N9997;
G24;
G0 Z+H0+1.0-H10 M5;
G9;
G12;
M99 P9998;
N9996;
;
(-----ERROR-----);
;
M00 (-----ERROR-----);
;
(-----ERROR-----@-----);
;
N9995;
M00 (-----ERROR-----@-----);
;
(O,P,Q,I);
;
N9994;
M00(O,P,Q,I);
;
N9998;

```



MG50 - Uddeholm Orvar Supreme



DESCRIÇÃO

Reconhecido como um aço versátil devido aos diversos campos onde é aplicado. Desde os moldes para injeção de plásticos até como material para veios de elevada resistência mecânica. Sendo um aço refundido (ESR), possui um elevado grau de pureza e reduzida dimensão de grão. Deste modo, são notórias as melhorias a nível de durabilidade e prestações das ferramentas e órgãos de máquinas quando utilizado.

ESTADO DE FORNECIMENTO

Recozido

APLICAÇÕES PRINCIPAIS

Moldes para fundição injetada de alumínio, estanho, chumbo e ligas de zinco e magnésio  
Moldes para plástico

DUREZA DE FORNECIMENTO

MIN: -  
MED: -  
MAX: 235 HB

COMPOSIÇÃO	SERVIÇOS	TRATAMENTOS TÉRMICOS	DOWNLOAD
------------	----------	----------------------	----------

NORMAS

EN: X 40CrMoV5-1-1
AISI: H13 Premium
DIN: X 40 CrMoV5-1
W.NR.: 1.2344

FORNECIMENTO: EN ISO 4957

PERFIS DISPONÍVEIS

	Espessura	Tolerância
Redondo	Sob Consulta	-
Quadrado	Sob Consulta	-
Rectangular	Sob Consulta	-

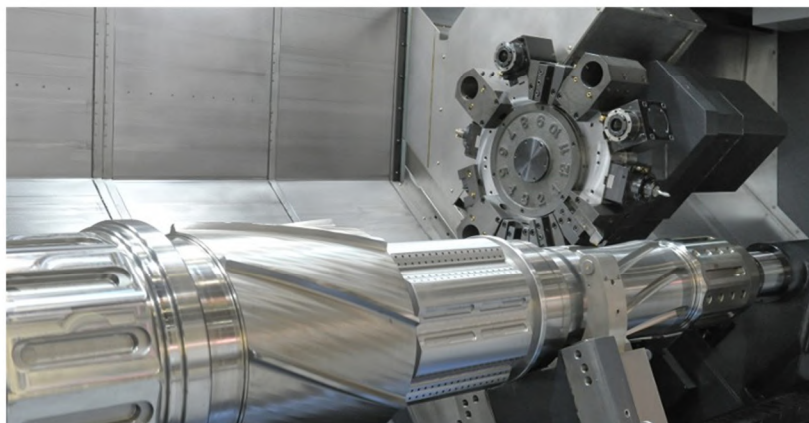
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) 1

	Min	Med	Max
C	0,35		0,42
Si	0,80		1,20
Mn	0,25		0,50
P			0,030
S			0,020
Cr	4,80		5,50
Mo	1,20		1,50
V	0,85		1,15

PROPRIEDADES FÍSICAS

Densidade : 7,80								
Coeficiente de Dilatação Térmica, 10 <sup>-6</sup> m/mK								
20 a 100 C	20 a 200 C	20 a 300 C	20 a 400 C	20 a 500 C	20 a 600 C	20 a 700 C		
---	---	---	12,60	---	13,2	---		
Condutibilidade Térmica, W/mK								
20 C	200 C	300 C	350 C	400 C	600 C	700 C		
25	---	---	---	---	29	30		
Módulo de Elasticidade, GPa								
-100 C	0 C	20 C	100 C	200 C	300 C	400 C	500 C	600 C
---	---	210	---	---	---	180	---	140

# FR3



## DESCRIÇÃO

Aço ao cromo-níquel-molibdênio tratado para aplicações de esforço superior aos Aços de Construção ao carbono. A Nitruração melhora significativamente a sua resistência ao desgaste efadiga.

## ESTADO DE FORNECIMENTO

Tratado

## APLICAÇÕES PRINCIPAIS

Órgãos de Máquinas  
Semi-eixos  
Veios de torção e flexão  
Rodas dentadas  
Sem-fins  
Cavilhas  
Parafusos e Porcas  
Pernos

## DUREZA DE FORNECIMENTO

MIN: -  
MED: ≈ 300 HB  
MAX: -

### COMPOSIÇÃO

### SERVIÇOS

### TRATAMENTOS TÉRMICOS

### DOWNLOAD

## NORMAS

EN: 34 CrNiMo 6

AIISI: 4337

DIN: 34 CrNiMo 6

AFNOR: 35NCD6

UNE: (F-1272)

W.NR.: 1.6582

FORNECIMENTO: EN 10083-3

## PERFIS DISPONÍVEIS

	Espessura	Tolerância
Redondo	14 - 230 mm	EN 10060

## COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) 1

	Min	Med	Max
C	0,30		0,38
Si			0,40
Mn	0,50		0,80
P			0,025
S			0,035
Cr	1,30		1,70
Mo	0,15		0,30
Ni	1,30		1,70

## PROPRIEDADES FÍSICAS

Densidade : 7,84

Coefficiente de Dilatação Térmica, 10<sup>-6</sup>m/mK

20 a 100 C	20 a 200 C	20 a 300 C	20 a 400 C	20 a 500 C	20 a 600 C	20 a 700 C
12,1	12,7	13,2	13,6	---	---	---

Condutibilidade Térmica, W/mK

20 C	200 C	300 C	350 C	400 C	600 C	700 C
33,7	---	---	---	---	---	---

Módulo de Elasticidade, GPa

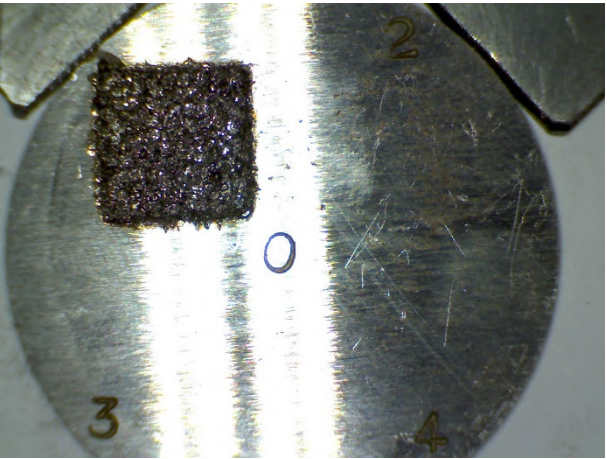
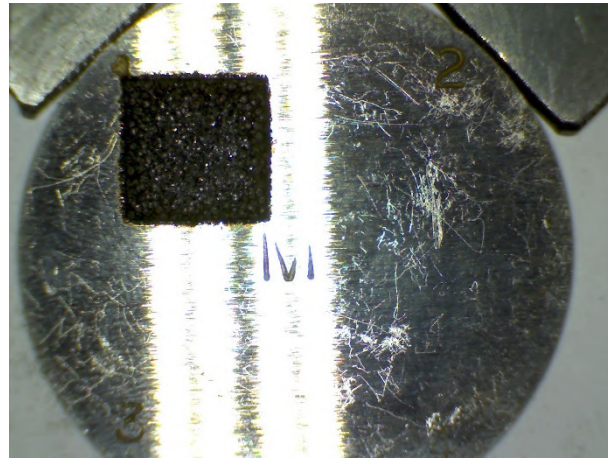
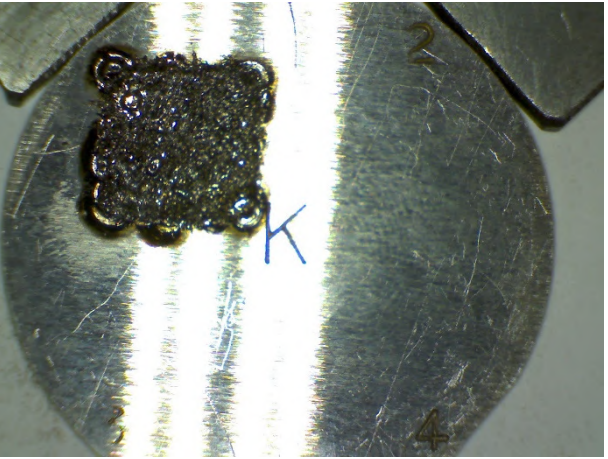
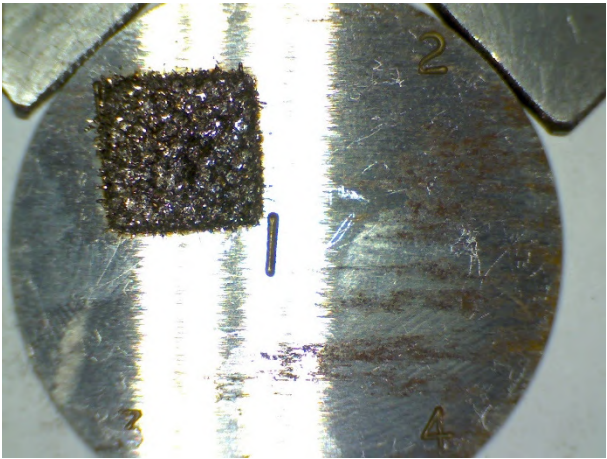
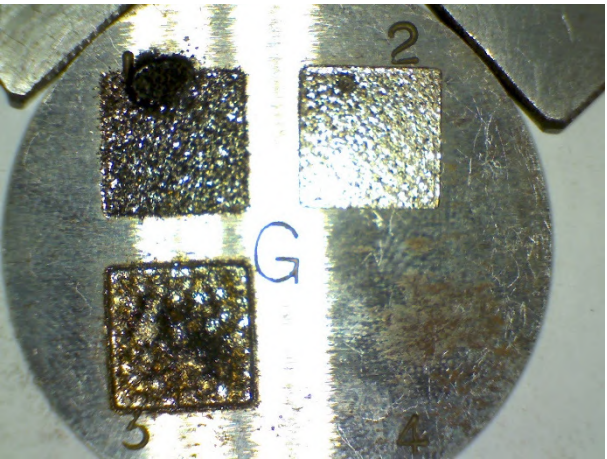
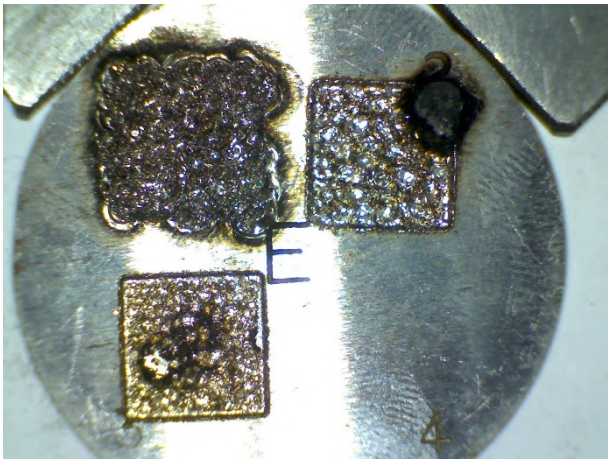
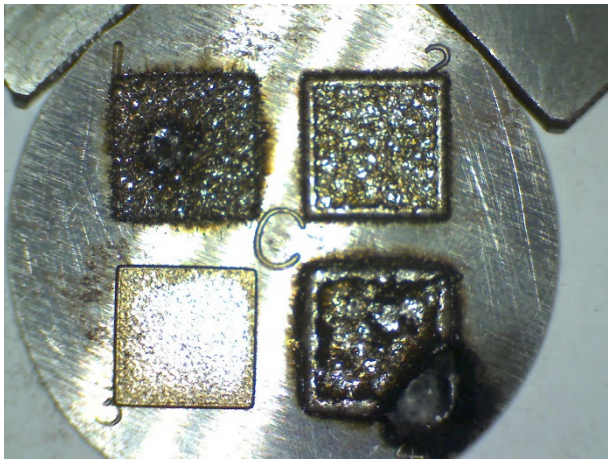
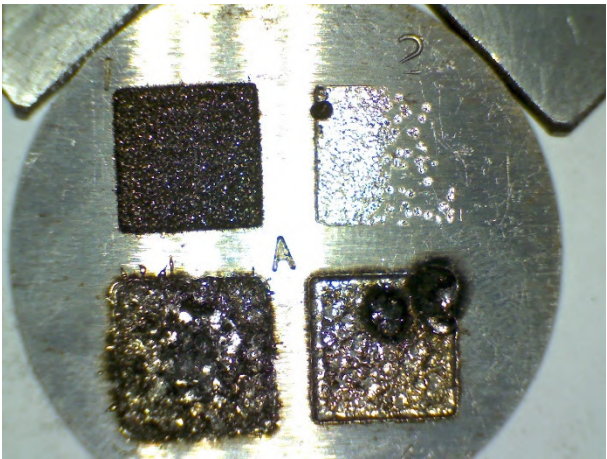
-100 C	0 C	20 C	100 C	200 C	300 C	400 C	500 C	600 C
---	---	210	---	---	---	---	---	---

Anexo VII Tabela de resultados obtidos para o aço pré tratado 1.6582

Provete	Série	Ensaio	PIP (g)	PFP (g)	PR (g)	Tempo (s)	TRM (cm^3/s)	PIE (g)	PFE (g)	DE (g)	Ra	$\overline{Ra}$	$\sigma Ra$	Rz	$\overline{Rz}$	$\sigma Rz$	Razão Rz/Ra
A1	1	1	26,6	26,2	0,4	107	4,77E-04	39,9	39,9	0	13,639	13,133	0,606	67,094	65,318	1,920	4,97
											12,461			63,281			
											13,300			65,579			
C1	1	2	27,5	27	0,5	83	7,68E-04	37,6	37,5	0,1	22,877	22,493	0,366	107,405	106,793	2,047	4,75
											22,149			104,510			
											22,453			108,464			
E1	1	3	26,6	26,2	0,4	73	6,99E-04	39,5	39,5	0	19,489	19,411	0,733	100,915	98,527	2,098	5,08
											18,642			96,978			
											20,101			97,688			
G1	1	4	26,5	26,4	0,1	510	2,50E-05	37,8	37,8	0	10,159	9,924	0,212	54,507	52,753	2,523	5,32
											9,746			49,861			
											9,867			53,891			
I1	2	5	27,5	27	0,5	58	1,10E-03	34,6	34,5	0,1	16,466	16,133	0,430	93,149	86,988	5,382	5,39
											16,285			83,204			
											15,647			84,612			
K1	2	6	26,5	26	0,5	407	1,57E-04	39,7	39,6	0,1	21,072	19,250	1,578	100,606	95,627	4,313	4,97
											18,317			93,057			
											18,360			93,218			
M1	2	7	27,5	27,2	0,3	1355	2,82E-05	34,2	34,2	0	6,160	6,513	0,454	33,863	35,264	1,396	5,41
											6,354			35,275			
											7,025			36,654			
O1	2	8	27,5	27	0,5	957	6,66E-05	31,4	31,3	0,1	20,311	20,437	0,109	91,448	94,118	2,582	4,61
											20,503			94,305			
											20,498			96,602			
A3	3	9	26,2	25,7	0,5	123	5,19E-04	35,4	35,3	0,1	18,074	18,662	0,513	81,340	80,855	0,619	4,33
											18,896			81,068			
											19,017			80,158			
C3	3	10	27	26,7	0,3	2630	1,45E-05	35,9	35,8	0,1	1,831	1,849	0,025	12,212	11,874	0,296	6,42
											1,838			11,745			
											1,878			11,664			
E3	3	11	26,2	25,8	0,4	139	3,67E-04	37,6	37,5	0,1	13,286	13,420	0,181	58,861	60,648	2,872	4,52
											13,349			59,122			
											13,626			63,961			
G3	3	12	26,4	26	0,4	77	6,63E-04	35,3	35,2	0,1	12,812	12,625	0,198	63,977	63,368	0,574	5,02
											12,417			63,288			
											12,645			62,838			
A2	4	13	25,7	25,7	0	1620	0,00E+00	38,4	38,4	0	4,122	3,910	0,192	24,735	24,346	0,366	6,23
											3,857			24,294			



											3,750			24,008			
C2	4	14	26,7	26,2	0,5	366	1,74E-04	36	36	0	15,051	15,297	0,469	76,213	77,249	4,509	5,05
											15,002			73,348			
											15,838			82,185			
E2	4	15	25,8	25,5	0,3	231	1,66E-04	38	37,9	0,1	18,187	18,297	0,159	95,319	93,381	1,711	5,10
											18,480			92,748			
											18,225			92,077			
G2	4	16	26	26	0	608	0,00E+00	38,9	38,9	0	2,860	2,102	0,695	18,757	15,510	3,219	7,38
											1,950			15,453			
											1,495			12,320			
A4	5	17	25,7	25,4	0,3	766	5,00E-05	36	36	0	13,153	13,722	0,493	66,655	68,459	1,567	4,99
											14,031			69,247			
											13,982			69,476			
C4	5	18	26,7	25,8	0,9	164	7,00E-04	36,1	36	0,1	6,773	6,268	0,438	33,615	28,443	4,529	4,54
											6,049			25,186			
											5,983			26,528			

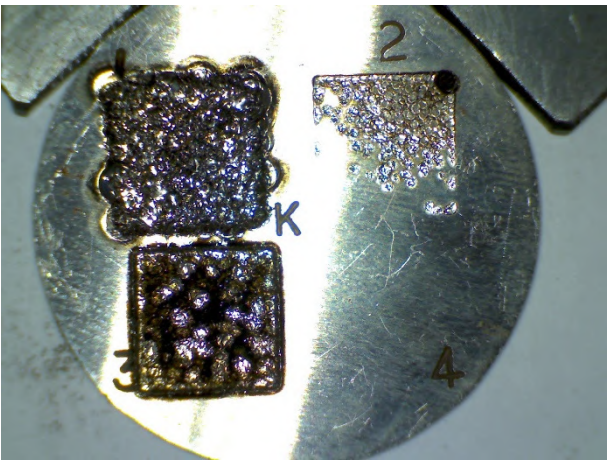
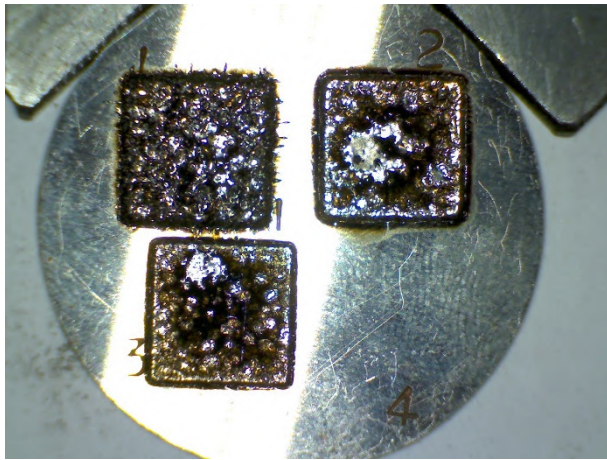
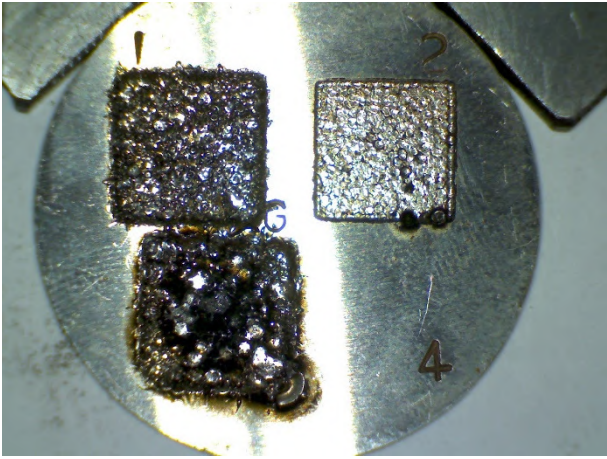
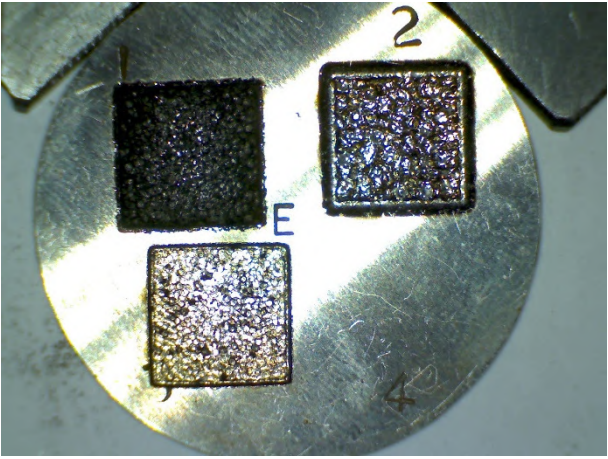
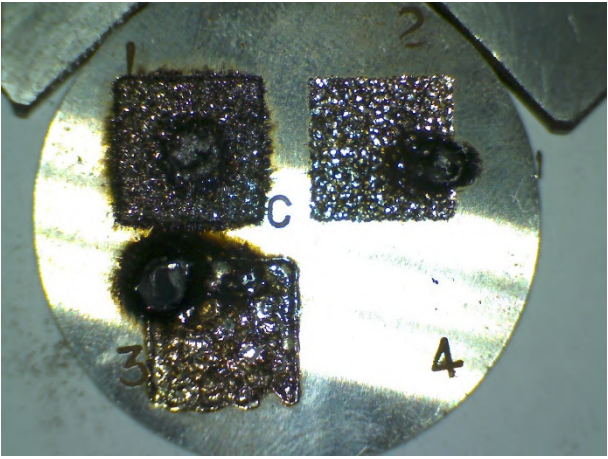
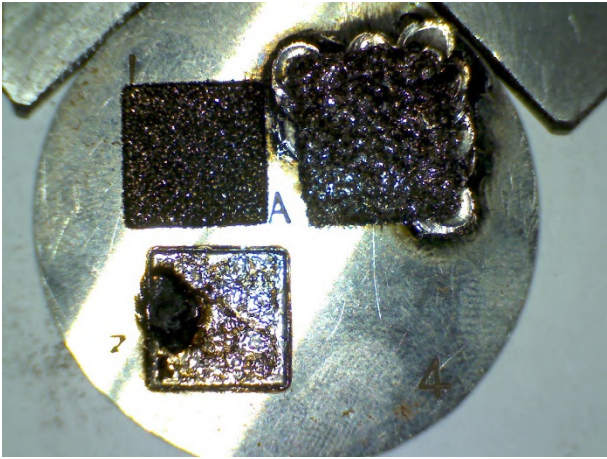


Anexo VIII Tabela de resultados obtidos para o aço temperado 1.2344

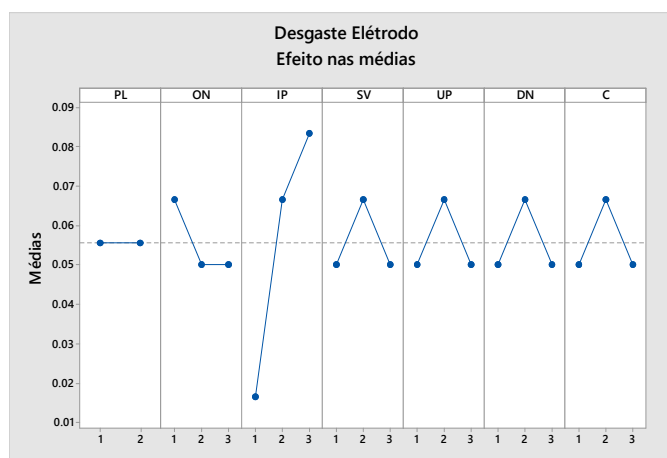
Provete	Série	Ensaio	PIP (g)	PFP (g)	PR (g)	Tempo (s)	TRM (cm^3/s)	PIE (g)	PFE (g)	DE (g)	Ra	$\overline{Ra}$	$\sigma Ra$	Rz	$\overline{Rz}$	$\sigma Rz$	Razão Rz/Ra
A1	1	1	21,1	21	0,1	91	1,10E-03	36,3	36,1	0,2	11,278	11,308	1,046	58,132	56,517	3,899	4,998
12,368											59,350						
10,277											52,070						
C1		2	21,2	20,7	0,5	201	2,49E-03	37,8	37,7	0,1	20,074	20,396	0,330	103,457	106,413	2,560	5,217
20,381											107,848						
20,733											107,934						
A2		3	20,9	20,1	0,8	137	5,84E-03	35,5	35,5	0	21,994	19,932	1,788	106,919	96,647	8,900	4,849
18,988											91,799						
18,814											91,224						
C2		4	20,7	20,6	0,1	235	4,26E-04	30,7	30,6	0,1	5,185	5,271	0,086	31,588	30,872	0,710	5,857
5,271											30,168						
5,357											30,861						
I1	2	5	21,2	20,7	0,5	55	9,09E-03	39,2	39,1	0,1	19,632	17,610	1,827	87,995	77,122	9,853	4,379
17,121											74,587						
16,078											68,785						
K1		6	21,2	20,6	0,6	421	1,43E-03	38,9	38,8	0,1	22,916	23,401	0,472	105,946	103,918	2,228	4,441
23,859											104,275						
23,428											101,533						
E1		7	21,4	21	0,4	2531	1,58E-04	38,9	38,8	0,1	5,979	5,785	0,169	34,443	33,939	0,437	5,867
5,671											33,662						
5,704											33,713						
G1		8	21,2	20,7	0,5	616	8,12E-04	38,8	38,5	0,3	15,918	16,684	0,665	73,233	76,366	2,750	4,577
17,123											78,378						
17,01											77,488						
G2	3	9	20,7	20,6	0,1	3480	2,87E-05	39,8	39,8	0	2,346	2,371	0,024	12,453	12,095	0,336	5,101
2,393											12,046						
2,375											11,786						
E2		10	20,9	20,3	0,6	312	1,92E-03	40,4	40,4	0	15,769	15,313	0,401	60,347	61,790	2,440	4,035
15,153											60,416						
15,017											64,607						
I2		11	20,7	20,1	0,6	215	2,79E-03	36	36	0	10,035	10,196	0,637	52,172	52,611	4,859	5,160
9,655											47,987						
10,899											57,675						
K2		12	20,6	20,6	0	802	0,00E+00	36,9	36,9	0	3,52	3,511	0,057	18,195	17,561	0,578	5,002
3,562											17,426						
3,45											17,063						
G3	4	13	20,6	20,3	0,3	147	2,04E-03	38,8	38,8	0	12,365	12,480	0,117	63,311	63,246	0,158	5,068
12,477											63,066						



											12,599			63,362			
E3		14	20,3	19,9	0,4	6534	6,12E-05	36,2	36,2	0	2,874	2,753	0,105	16,676	15,592	0,949	5,664
											2,7			15,193			
											2,684			14,908			
											10,799			44,446			
I3		15	20,1	19,7	0,4	198	2,02E-03	35,4	35,4	0	10,846	10,833	0,029	42,186	42,814	1,426	3,952
											10,853			41,810			
											14,657			65,628			
K3		16	20,6	20,1	0,5	85	5,88E-03	31,8	31,8	0	14,364	14,303	0,388	66,174	65,329	1,028	4,567
											13,889			64,185			
											6,862			28,304			
A3	5	17	20	19,9	0,1	214	4,67E-04	33,2	33,2	<u>0</u>	7,799	6,924	0,846	30,148	28,633	1,380	4,136
											6,11			27,447			
											15,946			74,614			
C3		18	20,7	20,5	0,2	87	2,30E-03	35,8	35,7	<u>0,1</u>	15,029	15,254	0,611	74,978	73,808	1,721	4,838
											14,788			71,831			

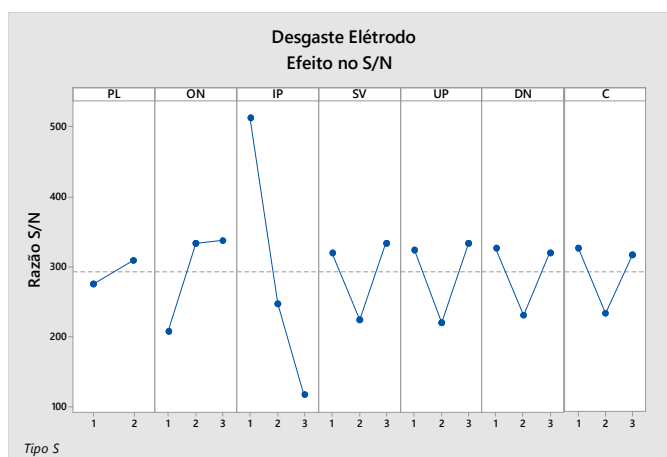


## Anexo IX Gráficos e respectivas Tabelas de análise de resposta média e S/N para o Desgaste do eletrodo no aço 1.6582



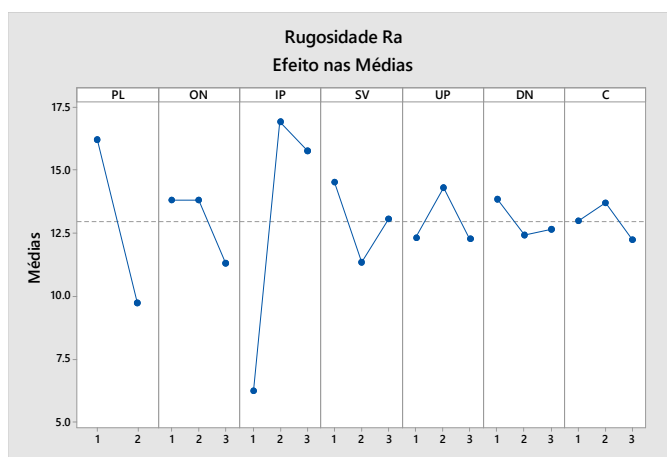
Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	0,05556	0,06667	0,01667	0,05	0,05	0,05	0,05
2	0,05556	0,05	0,06667	0,06667	0,06667	0,06667	0,06667
3		0,05	0,08333	0,05	0,05	0,05	0,05
Efeito	0	0,01667	0,06667	0,01667	0,01667	0,01667	0,01667
Posição	7	4,5	1	4,5	6	2	3

A amarelo encontram-se valores iguais, ou seja, com 2 níveis ótimos e por isso não significativos.

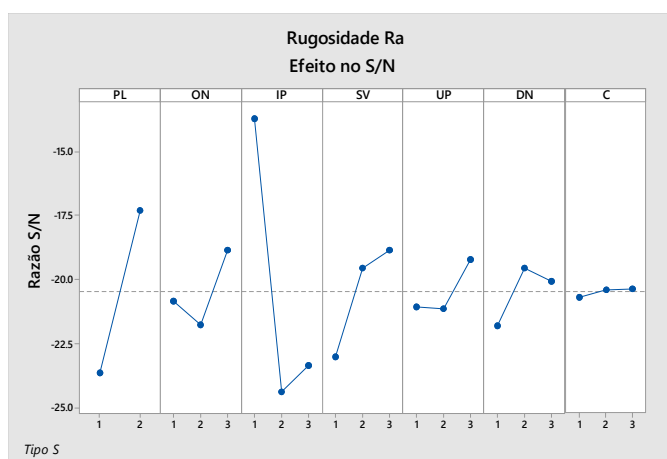


Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	275,6	206,7	513,3	320	323,3	326,7	326,7
2	308,9	333,3	246,7	223,3	220	230	233,3
3		336,7	116,7	333,3	333,3	320	316,7
Efeito	33,3	130	396,7	110	113,3	96,7	93,3
Posição	7	2	1	4	3	5	6

## Anexo X Gráficos e respectivas Tabelas de análise de resposta média e S/N para Ra no aço 1.6582



Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	16,217	13,822	6,238	14,527	12,314	13,846	12,992
2	9,721	13,802	16,917	11,324	14,313	12,416	13,687
3		11,284	15,752	13,058	12,281	12,646	12,228
Efeito	6,496	2,538	10,679	3,203	2,032	1,431	1,459
Posição	2	4	1	3	5	7	6



Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	-23,65	-20,85	-13,7	-23,05	-21,09	-21,81	-20,68
2	-17,32	-21,76	-24,4	-19,55	-21,15	-19,56	-20,39
3		-18,84	-23,35	-18,86	-19,21	-20,07	-20,37
Efeito	6,33	2,92	10,7	4,19	1,94	2,25	0,31
Posição	2	4	1	3	6	5	7



## Anexo XI Tabelas de análise de variâncias ANOVA no aço 1.6582

### TRM

Fator	GL	SS	MS	F <sub>0</sub>	P
PL	1	0	0	3,27	0,145
ON	2	0	0	2,57	0,191
IP	2	0,000001	0	5,41	0,073
SV	2	0	0	4,27	0,102
UP	2	0	0	0,42	0,68
DN	2	0	0	0,87	0,487
C	2	0	0	2,62	0,187
Erro	4	0	0		
Total	17	0,000002			

### DE

Fator	GL	SS	MS	F <sub>0</sub>	P
PL	1	0	0	0	1
ON	2	0,001111	0,000556	0,09	0,915
IP	2	0,014444	0,007222	1,18	0,395
SV	2	0,001111	0,000556	0,09	0,915
UP	2	0,001111	0,000556	0,09	0,915
DN	2	0,001111	0,000556	0,09	0,915
C	2	0,001111	0,000556	0,09	0,915
Erro	4	0,024444	0,006111		
Total	17	0,044444			

### Ra

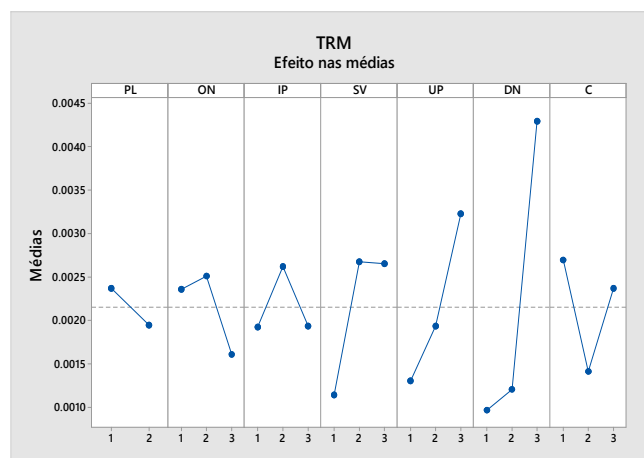
Fator	GL	SS	MS	F <sub>0</sub>	P
PL	1	189,904	189,904	20,86	0,01
ON	2	25,558	12,779	1,4	0,345
IP	2	411,801	205,901	22,62	0,007
SV	2	30,848	15,424	1,69	0,293
UP	2	16,255	8,127	0,89	0,478
DN	2	7,08	3,54	0,39	0,701
C	2	6,39	3,195	0,35	0,724
Erro	4	36,415	9,104		
Total	17	724,25			

$F(\alpha; nF; nE) = F(0,05; 1; 4) = 7,71$  (apenas válido para o fator PL)

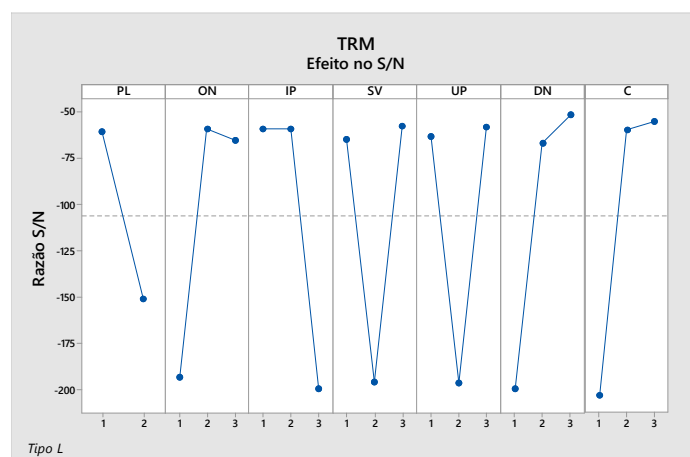
$F(\alpha; nF; nE) = F(0,05; 2; 4) = 6,94$  (válidos para os restantes fatores)

**Nota:** A verde encontram-se os valores de F<sub>0</sub> que satisfazem a desigualdade  $F_0 > F_c$  e por isso são considerados significativos, os restantes são marcados a vermelho e são não significativos

**Anexo XII Gráficos e respectivas Tabelas de análise de resposta média e S/N para a Taxa de Remoção de Material no aço 1.2344.**

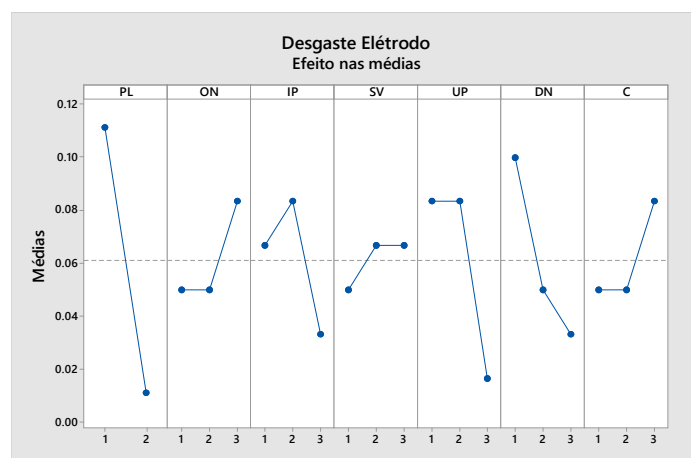


Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	0,002374	0,002357	0,001921	0,001139	0,001305	0,000974	0,002694
2	0,001943	0,002511	0,002618	0,002679	0,001938	0,001204	0,001414
3		0,001608	0,001935	0,002657	0,003232	0,004297	0,002368
Efeito	0,000431	0,000903	0,000697	0,001541	0,001926	0,003323	0,00128
Posição	7	5	6	3	2	1	4



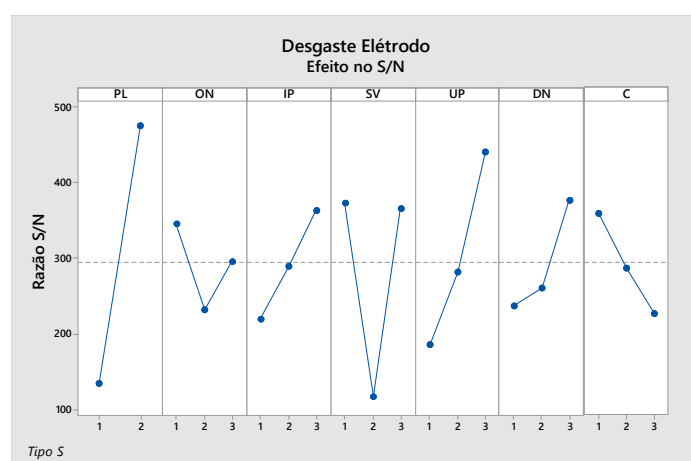
Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	-61,09	-193,56	-59,23	-64,84	-63,37	-199,72	-203,29
2	-151,26	-59,52	-59,45	-195,92	-196,64	-66,95	-59,98
3		-65,44	-199,85	-57,77	-58,51	-51,85	-55,26
Efeito	90,17	134,04	140,62	138,15	138,13	147,87	148,02
Posição	7	6	3	4	5	2	1

**Anexo XIII Gráficos e respectivas Tabelas de análise de resposta média e S/N para o Desgaste do eletrodo no aço 12344.**



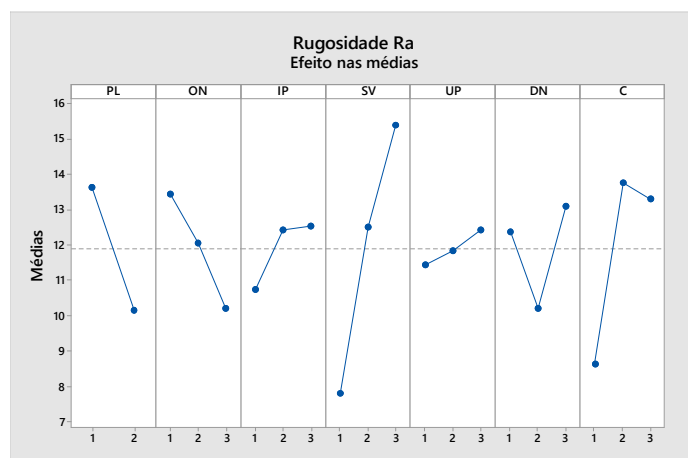
Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	0,11111	0,05	0,06667	0,05	0,08333	0,1	0,05
2	0,01111	0,05	0,08333	0,06667	0,08333	0,05	0,05
3		0,08333	0,03333	0,06667	0,01667	0,03333	0,08333
Efeito	0,1	0,03333	0,05	0,01667	0,06667	0,06667	0,03333
Posição	1	5	4	7	2	3	6

A amarelo encontram-se valores iguais, ou seja, com 2 níveis ótimos e por isso não significativos.

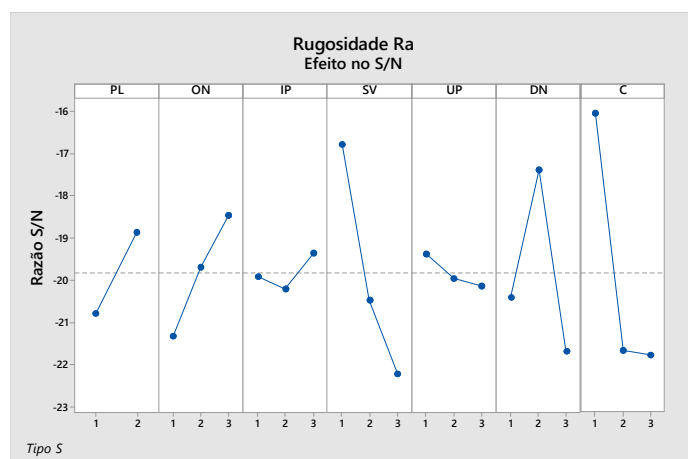


Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	133,8	345,7	218,8	372,3	185,7	236,9	359
2	475	232	288,4	116	281,7	260	286,7
3		295,1	363,3	365,1	440	376,7	226,1
Efeito	341,2	113,7	144,5	256,3	254,3	139,8	132,9
Posição	1	7	4	2	3	5	6

**Anexo XIV Gráficos e respectivas Tabelas de análise de resposta média e S/N para Ra no aço 1.2344**



Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	13,64	13,443	10,743	7,817	11,449	12,384	8,643
2	10,174	12,058	12,427	12,506	11,833	10,226	13,775
3		10,22	12,55	15,398	12,438	13,11	13,303
Efeito	3,466	3,222	1,807	7,58	0,989	2,883	5,132
Posição	3	4	6	1	7	5	2



Nível	PL	ON	IP	SV	UP	DN	C
1	-20,8	-21,34	-19,91	-16,78	-19,39	-20,42	-16,05
2	-18,86	-19,69	-20,22	-20,48	-19,96	-17,38	-21,67
3		-18,46	-19,36	-22,24	-20,14	-21,69	-21,77
Efeito	1,93	2,88	0,86	5,46	0,75	4,31	5,72
Posição	5	4	6	2	7	3	1

## Anexo XV Tabelas de análise de variâncias ANOVA no aço 1.2344

### TRM

Fator	GL	SS	MS	F <sub>0</sub>	P
PL	1	0,000001	0,000001	0,11	0,755
ON	2	0,000003	0,000001	0,19	0,836
IP	2	0,000002	0,000001	0,13	0,884
SV	2	0,000009	0,000005	0,63	0,58
UP	2	0,000012	0,000006	0,77	0,52
DN	2	0,000041	0,000021	2,76	0,176
C	2	0,000005	0,000003	0,35	0,721
Erro	4	0,00003	0,000007		
Total	17	0,000103			

### DE

Fator	GL	SS	MS	F <sub>0</sub>	P
PL	1	0,045	0,045	6,48	0,064
ON	2	0,004444	0,002222	0,32	0,743
IP	2	0,007778	0,003889	0,56	0,61
SV	2	0,001111	0,000556	0,08	0,925
UP	2	0,017778	0,008889	1,28	0,372
DN	2	0,014444	0,007222	1,04	0,433
C	2	0,004444	0,002222	0,32	0,743
Erro	4	0,027778	0,006944		
Total	17	0,122778			

### Ra

Fator	GL	SS	MS	F <sub>0</sub>	P
PL	1	54,048	54,048	0,7	0,45
ON	2	31,358	15,679	0,2	0,824
IP	2	12,231	6,116	0,08	0,925
SV	2	175,623	87,811	1,14	0,407
UP	2	2,984	1,492	0,02	0,981
DN	2	26,996	13,498	0,17	0,846
C	2	96,567	48,284	0,63	0,58
Erro	4	309,012	77,253		
Total	17	708,819			

$F(\alpha; nF; nE) = F(0,05; 1; 4) = 7,71$  (apenas válido para o fator PL)

$F(\alpha; nF; nE) = F(0,05; 2; 4) = 6,94$  (válidos para os restantes fatores)

**Nota:** A vermelho encontram-se os valores de  $F_0$  que não satisfazem a desigualdade  $F_0 > F_c$  e por isso são considerados não significativos.